

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR, UNIVERSITAT DE LLEIDA

# MILLORA DEL SISTEMA DE CLORACIÓ MUNICIPAL A PARTIR D'ALGORITME DE CONTROL ADAPTATIU

GRAU EN ENGINYERIA ELECTRÒNICA INDUSTRIAL I AUTOMÀTICA

AUTOR:

MORENO BIFET, ABEL

TUTOR:

CLARIÀ SANCHO, FRANCISCO



**La meva grandesa no rau en no haver caigut mai,  
Sinó en haver-me aixecat sempre  
Napoleó Bonaparte**



## **Agraïments**

En primer lloc al tutor del treball, Francisco Clariá per la paciència, esforç i dedicació que ha tingut en el desenvolupament d'aquest treball.

Al equip humà de Laiccona S.L. per haver-me format amb una paciència infinita i donar-me la oportunitat de conèixer a fons el sector del tractament d'aigües.

Finalment als meus pares i familiars, per haver-me recolzat sempre i donar-me forces en els moments més durs. Sense vosaltres no hauria arribat fins aquí.



## Resum del treball

Aquest treball es centra en la millora de la qualitat de l'aigua potable distribuïda a una població a partir de la dosificació de desinfectant en la canonada general de distribució. Per tal de poder realitzar un control sobre la planta (xarxa de distribució), primer es mostra necessari l'obtenció del model matemàtic que regeixi el sistema.

Un cop caracteritzat el sistema es proposarà realitzar un control clàssic, amb llaç de realimentació i un controlador amb paràmetres invariants en el temps.

Finalment es proposarà realitzar el control de la planta a partir d'un controlador adaptatiu, amb paràmetres que poden ser variables.





## Índex

1.-Introducció .....	3
2.-Objectius .....	4
3.-Antecedents .....	4
4.-Definicions, abreviatures i acrònims .....	7
5.-Normativa .....	9
6.-Modelització de la planta.....	12
6.1.-Model ARMAX.....	14
7.-Sistema de control clàssic .....	18
7.1.-Control proporcional amb bucle obert .....	18
7.2.-Control proporcional en bucle tancat.....	19
7.3.-Control proporcional i derivatiu en bucle tancat.....	20
8.-Sistema de control adaptatiu.....	22
8.1.-Models de Control adaptatiu .....	22
8.2.-Model de control adaptatiu amb model de referencia (MRAC).....	23
8.3.-Proposta de control adaptatiu .....	24
8.3.1.-Senyal de consigna $U(t)$ .....	25
8.3.2.-Model de referencia.....	25
8.3.3.-Llei d'adaptació i controlador .....	26
8.3.4.-Exemples d'execució.....	27
9.-Conclusions .....	29
10.-Bibliografia i referències .....	31
Annex A Articles extesos del RD 140/2003 .....	35
Annex B Reguladors auto ajustables (STR).....	39
Annex C Primera aproximació del nombre de pols i zeros: .....	40
Codi Matlab .....	40
Resultats codi: .....	41
Annex D Escollir el model de la planta.....	43
Codi Matlab .....	43
Resultats del codi .....	44
Annex E Selecció del nombre pols i zeros final del model ARMAX.....	46
Codi Matlab .....	46
Resultats codi .....	47

Annex F Control classic.....	50
Codi Matlab: .....	50
Resultats codi Matlab.....	52
Annex G Control adaptatiu.....	54
Codi Matlab .....	54
Resultats codi: .....	55

## Taula d'il·lustracions

Il·lustració 1 Consum diari d'aigua per hores.....	4
Il·lustració 2 Consum anual d'aigua per mesos.....	5
Il·lustració 3, esquema del sistema actual de cloració de l'aigua .....	5
Il·lustració 4 Annex1 taula C Real Decreto 140/2003, Valors paramètrics en aigua potable ....	10
Il·lustració 5 Annex V taula A1 a RD 140/2003, freqüència de mostreig en dipòsit de capçalera, .....	10
Il·lustració 6 Annex V, Taula A1 c, RD 140/2003, freqüència de mostreig en la xarxa de distribució.....	11
Il·lustració 7 Annex V, Taula A1 B, RD 140/2003, freqüència de mostreig en l'aixeta del consumidor .....	11
Il·lustració 8, Sinòptic de la planta a caracteritzar .....	12
Il·lustració 9, Codi Matlab per a l'obtenció del conjunt de possibles pols i zeros del sistema ..	13
Il·lustració 10, Possibles pols i zeros per a un sistema ARX i l'error respecte als valors de validació .....	14
Il·lustració 11, Esquema genèric d'un model ARMAX.....	14
Il·lustració 12, Exactitud del model proposat segons la funció: armax.....	15
Il·lustració 13, Sortida del sistema proposat, senyal mostrejada i senyal consigna .....	16
Il·lustració 14, Pols i zeros del sistema ARMAX obtingut.....	17
Il·lustració 15, Esquema clàssic de sistema de control .....	18
Il·lustració 16, Resposta del sistema amb bucle obert i acció proporcional amb la senyal mostrejada i de setpoint .....	18
Il·lustració 17, diagrama de blocs control realimentat .....	19
Il·lustració 18, Sortida del sistema amb bucle tancat comparat amb la senyal mostrejada .....	19
Il·lustració 19, diagrama de blocs amb controlador PD .....	20
Il·lustració 20, Resposta del sistema en bucle tancat i control PD comparat amb la senyal mostrejada .....	20
Il·lustració 21, Diagrama de blocs controlador adaptatiu en bucle obert .....	22
Il·lustració 22, Diagrama de blocs controlador adaptatiu amb llaç de realimentació .....	22
Il·lustració 23, Diagrama de blocs control adaptatiu amb model de referència.....	23
Il·lustració 24, Diagrama de blocs del sistema de control proposat .....	24
Il·lustració 25, Representació del model diagrama de blocs .....	24
Il·lustració 26, Esquema físic sistema de control adaptatiu.....	25
Il·lustració 27, carcassa d'un controlador amb acció proporcional estàndard .....	25
Il·lustració 28, diagrama de blocs de la llei d'adaptació del sistema (filtre FIR) .....	26
Il·lustració 29, diagrama de pols i zeros del sistema en l'inici .....	27
Il·lustració 30, resposta del sistema a un graó unitari .....	27
Il·lustració 31, resposta del sistema a graó d'amplitud 0,7 .....	28
Il·lustració 32, resposta de sistema a un graó de diferents amplituds .....	28
Il·lustració 33, modificacions al sistema de cloració .....	30

## 1.-Introducció

Degut al continu creixement de la població a nivell mundial, la potabilització i distribució d'aigua es convertirà en el pròxim any en un tema de màxima importància a escala internacional. Hi ha diversos articles científics avaluant i proposant mètodes més eficients per als tractaments duts a terme en estacions potabilitzadores d'aigua, així com sistemes de control per a la correcta dosificació de substàncies químiques en aquesta etapa[1][2][3].

En l'actualitat degut a la falta de coneixement de l'etapa de distribució en la sortida de les Estacions de Tractament d'Aigua Potable, es programa una dosificació més alta de la que realment es necessita de les substàncies químiques desinfectants, amb la intenció de minimitzar l'efecte de vaporització que pateixen al llarg del recorregut de distribució. L'autoritat sanitària per la seva part realitza esporàdics anàlisis de l'aigua que arriba al nucli de població, només per comprovar que no es sobrepassin els valors fixats per la llei d'elements pesants, i de desinfectants.

L'addició de desinfectant en l'aigua es realitza normalment en el dipòsit de distribució. Els controladors per a la dosificació de desinfectant, presenten en la seva majoria un caràcter purament proporcional, produint per tant pics en la concentració de clor al llarg del dia depenent del consum de la població.

El control adaptatiu neix en torn al 1950 per tal d'aconseguir un sistema de control per al sector de l'aviació que pogués englobar les variables dinàmiques del vent i altitud, ja que el control realimentat que s'utilitzava aleshores era efectiu només en un rang d'operació. Aquesta nova branca de la teoria de control sorgia de la limitació dels models lineals per a reproduir el món físic, on les pertorbacions són habituals i sovint aquestes noves entrades al sistema no poden ser depreciades. L'objectiu per tant era clar, aconseguir sistemes que ells mateixos siguin capaços de reajustar-se en denotar variacions en l'entrada o desviacions respecte al funcionament desitjat. Actualment una gran quantitat dels controladors degut a la seva fabricació genèrica, permeten variar algun dels seus paràmetres per tal d'ajustar-se, de la millor forma possible, a cada planta o procés.

En aquest treball s'estudiarà una dosificació més eficient de desinfectant (Hipoclorit sòdic), per tal de garantir la màxima qualitat de l'aigua en el punt de consum, posant especial èmfasi en l'etapa de distribució, ja que és on actualment no s'exerceix un control sobre la qualitat de l'aigua durant aquesta etapa del procés de subministrament d'aigua potable.

L'objectiu d'aquest treball serà estudiar l'etapa de distribució i exercir un control capaç d'adaptar-se a les variacions del punt de consigna garantint sempre un mínim de clor dissolt a la vegada però que no es produeixin sobrecloracions. Per a la realització del estudi, que inclou la modelització del sistema, així com les simulacions realitzades per a la posterior validació del sistema, s'ha utilitzat l'entorn software del *Matlab*.

## 2.-Objectius

En aquest present projecte s'abordarà la problemàtica de la caracterització d'una planta desconeguda i l'extracció del corresponent model matemàtic que la descrigui de la forma més senzilla, alhora que proporcioni un ajust el més fidel possible a la realitat.

Un cop obtinguda la funció de transferència del sistema s'estudiarà exercir un control mitjançant tècniques de control clàssic, es a dir, utilitzant un controlador amb part proporcional, integral, derivatiu, o combinacions d'aquestes accions.

A continuació es proposarà dissenyar el controlador a partir d'algoritmes de control adaptatiu tot observant la nova resposta del model més el controlador.

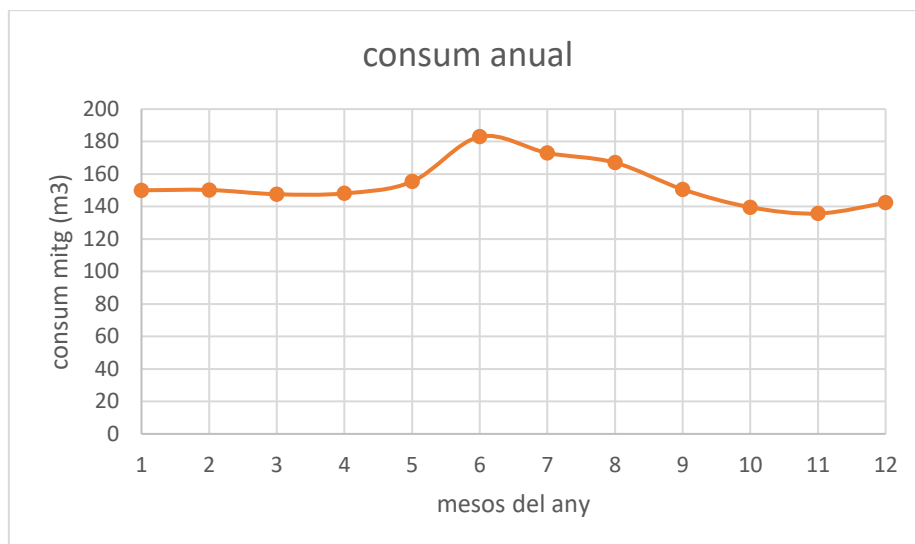
Finalment es compararan els dos tipus de control presentats per la planta per tal d'escollir el que millor s'ajusti a la senyal de consigna.

## 3.-Antecedents

La planta sotmesa a estudi és una conducció per a l'abastament d'un petit nucli de població. En aquesta distribució la cloració es realitza en l'interior del dipòsit de capçalera, on hi trobem a més a més l'únic punt de mostreig de desinfectant (hipoclorit sòdic). Tant la geometria com les dimensions són conegudes, ara bé el cabal que hi circula pel interior varia al llarg del dia en funció de la demanda. També trobem que aquest consum presenta una alta estacionalitat, ja que el municipi disposa de piscines públiques que es buiden un cop finalitzada la temporada de bany, fet que es nota en la quantitat d'aigua demanada en especial els dies pròxims a la obertura d'aquestes.

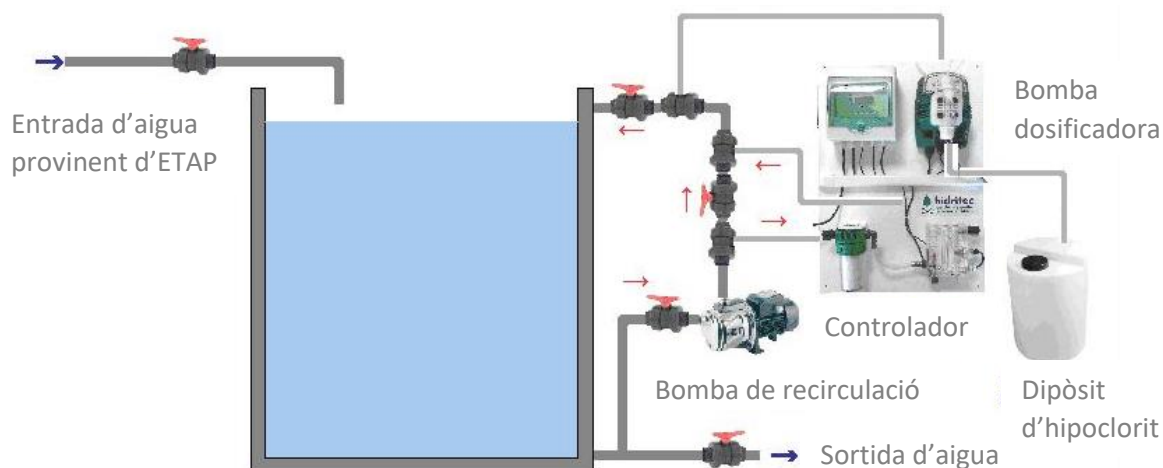


*Il·lustració 1 Consum diari d'aigua per hores*



Il·lustració 2 Consum anual d'aigua per mesos

Degut a que el punt d'injecció de clor es troba en el dipòsit de cloració, es produeix una pèrdua del nivell de concentració de clor fins a l'arribada a la vila, fet es degut a dues raons principalment, la pròpia inestabilitat del compost que fa que la concentració tendeixi a zero en un interval de temps elevat, i dels petits règims turbulents que s'originen en elements singulars de la instal·lació com poden ser aixetes, reduccions, colzes o en el propi contacte amb la superfície de la canonada[4], per tant la velocitat del fluid en la canonada de distribució també influirà en la variació de clor. Segons les recomanacions de la OMS [5] no es desitjable aquesta reducció ja que l'absència de desinfectant predisposa l'aparició de microorganismes que en alguns casos poden ser perjudicials per als éssers vius.



Il·lustració 3, esquema del sistema actual de cloració de l'aigua

Com s'ha comentat, la cloració es du a terme en l'interior del dipòsit de distribució. Per garantir la màxima homogeneïtzació del dipòsit en el seu conjunt, es troba instal·lada una bomba de recirculació (il·lustració 3), amb l'únic objectiu que l'aigua estigui en constant moviment i no s'estratifiqui el desinfectant (degut a la diferència de densitats amb l'aigua). A més es troba una derivació en el circuit de recirculació per tal de proporcionar aigua per al mostreig al analitzador de clor, que realitzant una acció purament proporcional, afegeix clor al sistema en funció del error entre la lectura mesurada i el valor desitjat. Valor que ha sigut introduït prèviament pels operaris.

En els moments de màxim consum d'aigua de la població així com els dies que precedeixen a l'obertura de les piscines del municipi es presenten com un moment crític per mantenir la concentració de clor del dipòsit de capçalera. Ja que l' elevat consum d'aigua és no dona temps a realitzar una correcta cloració del dipòsit. Tanmateix, en el moment que es finalitza aquests pics de consum la concentració de clor augmenta desmesuradament en el dipòsit ja que el controlador i analitzador de clor només realitza una acció proporcional, com la majoria que es troben actualment en el mercat, i només té en compte la distància de la lectura amb el concentració desitjada, no contempla cap altra variable del procés, fet que acaba ocasionant sobre cloracions o falta de desinfectant que es fan recurrents al llarg del any.

## 4.-Definicions, abreviatures i acrònims

**ETAP:** Estació de Tractament d'Aigua Potable.

### **Hipoclorit Sòdic**

(NaOCl) utilitzat a gran escala com purificant de superfícies, blanquejant en indústria tèxtil, eliminació d'olors i purificació de l'aigua. És un compost inestable ja que el clor present s'evapora de mitjana a raó de 0,75 grams de clor lliure per dia. És àmpliament utilitzat degut a la estabilitat que permet alhora del transport i emmagatzematge, tot i que pel seu caràcter corrosiu es indispensible unes mesures de protecció pels operaris que manipulen la substància.

### **Clor lliure**

és la quantitat de clor present a l'aigua que no està associada a cap partícula orgànica, per tant es troba en disposició de poder-se adherir a partícules orgàniques que puguin entrar en qualsevol moment a l'aigua.

### **Clor total**

Nombre que té en compte el clor lliure així com el que sí que està interaccionant amb partícules presents a l'aigua.

### **Aigua per a consum humà [6]**

c)Totes aquelles aigües, que ja sigui en estat original o bé després del tractament, siguin utilitzades per a beure, cuinar, preparació d'aliments, higiene personal o bé per a altres usos domèstics, siguin quin siguin el seu origen i independentment que es subministrin al consumidor a través de xarxes d'abastament públiques o privades, de cisternes o de dipòsits públics o privats.

b)Totes aquelles aigües, utilitzades en l'indústria alimentària per a tenir com a finalitat la fabricació, tractament, conservació de productes o substàncies destinades al consum humà, així com les utilitzades en la neteja de superfícies, objectes y materials que puguin estar en contacte amb aliments.

c) Totes aquelles aigües subministrades per al consum humà com a part d'una activitat comercial o pública, amb independència del volum mig diari d'aigua subministrada.

### **Substància**

Tot producte (substància o preparat) que s'afegeix a l'aigua o sigui utilitzat en la seva potabilització o millora, així com els utilitzats per a la neteja de superfícies, equips, recipients o utensilis que estiguin en contacte amb l'aigua de consum humà. Es divideixen en els següents grups:

a)Desinfectants per a l'aigua: productes per la desinfecció de l'aigua de consum humà.

b)Desinfectants per a superfícies: productes utilitzats per a la desinfecció d'equips, recipients, utensilis per al consum, superfícies o canonades relacionades amb la producció d'aigua de consum humà.



c)Algicides i antiincrustants: productes que eliminen o impedeixen el desenvolupament d'algues en l'aigua destinada a la producció d'aigua per a consum humà o que tingui acció antiincrustant o desincrustant.

d)Altres substàncies: la resta de productes que no estiguin inclosos en els apartats anteriors.

### **Sistema lineal**

Un sistema es lineal si en excitar-lo amb A, respon amb B i si l'excitem amb C respon amb D, si introduïm A+C al sistema, a la sortida obtindrem B+D.

### **Variable exògena**

El valor de les variables exògenes està determinat per factors o variables que no són inclosos e el model que s'està utilitzant.

### **Filtre FIR**

Els filtres digitals de resposta impulsional finita (Finite Impulse Response) es basen en obtindre la sortida a partir, d'exclusivament, de les entrades actuals i anteriors. Un filtre de longitud N respondria a l'expressió:

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n - 1) + \dots b_{N-1}x(n - N + 1)$$

### **Sistema de fase mínima**

Són sistemes en els quals les seves funcions de transferència presenten tots els pols i zeros en el semiplà esquerra, en el cas que estiguem parlant de funcions en el domini de Laplace, o bé dins els cercle unitat si ens trobem treballant en funcions en el domini discret.

## 5.-Normativa

En aquest apartat s'abordan les normatives referents a la qualitat de l'aigua, principalment el Reial Decreto 140/2003 [6] que es l'encarregat de fixar els criteris i estàndards de la qualitat de l'aigua per a consum humà.

### **Article 10. Tractament per a la potabilització de l'aigua per a consum humà:**

2.- Les aigües de consum humà distribuïdes al consumidor per les xarxes de distribució públiques o privades, cisternes o dipòsits s'hauran de desinfectar. En aquests cassos, els subproductes derivats de la desinfecció hauran de tenir els nivells més baixos possibles sense comprometre però en ningun moment la eficàcia de la desinfecció. Quant no hi hagi risc de contaminació o de creixement microbacterià al llarg de tota la xarxa de distribució fins a l'aixeta del consumidor, el gestor podrà sol·licitar a l'autoritat sanitària, la exempció de introduir desinfectant residual.

### **Article 18. Autocontrol:**

3. Els punts de mostreig per al control seran representatius del abastiment o parts del mateix i es fixaran pel gestor amb la supervisió de l'autoritat sanitària.

A) Per al cas de les xarxes de distribució es fixaran, al menys, els següents punt de mostreig:

- a) 1 a la sortida de la ETAP o dipòsit de capçalera.
- b) 1 a la sortida del dipòsit de regulació i/o distribució.
- c) 1 en cada un dels punts d'entrega entre els diferents gestors.
- d) 1 en la xarxa de distribució.

En els abastiments que subministren més de 20.000m<sup>3</sup>/dia, el número de punts de mostreig serà de 1 per cada 20.000m<sup>3</sup> o fracció d'aigua distribuïda per dia com a mesura anual.

C) Paràmetres inclosos en els anàlisis en funció del mètode de desinfecció:

- a) Nitrit: quan se utilitzi la cloraminació.
- b) Clor lliure residual: quan s'utilitzi el clor o derivats.
- c) Clor combinat residual: quan s'utilitzi la cloraminació.

### **Article 20. Control en l'aixeta del consumidor:**

1. Per a aigües de consum humà subministrades a través d'una xarxa de distribució pública o privada, el municipi, o en el seu defecte una altra entitat d'àmbit local, prendrà les mesures necessàries per a germanitzar la realització del control de la qualitat de l'aigua en l'aixeta del consumidor i l'elaboració periòdica d'un informe sobre els resultats obtinguts.

2. Els paràmetres a controlar en l'aixeta del consumidor son, al menys:

k) Clor lliure residual i/o clor combinat residual: quan s'utilitzi clor o els seus derivats per el tractament de potabilització d'aigua.

## Article 21. Freqüència de mostreig:

- La freqüència mínima de mostreig per als anàlisis de control y el anàlisis complets es portaran a la pràctica segons l'especificat en l'annex V.
- La freqüència de mostreig del desinfectant residual podrà incrementar-se quan l'autoritat sanitària ho estimi necessari.

3. El número de mostres anuals recollides en el l'aixeta del consumidor serà, de almenys, la que senyala l'annex V.

Parámetro	Valor paramétrico		Notas
31. Bacterias coliformes .....	0 UFC	En 100 ml	
32. Recuento de colonias a 22 °C			
A la salida de ETAP .....	100 UFC	En 1 ml	
En red de distribución .....	Sin cambios anómalos		
33. Aluminio .....	200	µg/l	
34. Amonio .....	0,50	mg/l	
35. Carbono orgánico total .....	Sin cambios anómalos	mg/l	1
36. Cloro combinado residual .....	2,0	mg/l	2, 3 y 4
37. Cloro libre residual .....	1,0	mg/l	2 y 3
38. Cloruro .....	250	mg/l	
39. Color .....	15	mg/l Pt/Co	
40. Conductividad .....	2.500	µS/cm <sup>-1</sup> a 20 °C	5
41. Hierro .....	200	µg/l	
42. Manganeseo .....	50	µg/l	
43. Olor .....	3 a 25 °C	Índice de dilución	
44. Oxidabilidad .....	5,0	mg O <sub>2</sub> /l	1 y 6
45. pH:			
Valor paramétrico mínimo .....	6,5	Unidades de pH	
Valor paramétrico máximo .....	9,5	Unidades de pH	
46. Sabor .....	3 a 25 °C	Índice de dilución	
47. Sodio .....	200	mg/l	

Parámetro	Valor paramétrico		Notas
48. Sulfato .....	250	mg/l	
49. Turbidez:			
A la salida de ETAP y/o depósito .....	1	UNF	
En red de distribución .....	5	UNF	

Il·lustració 4 Annex1 taula C Real Decreto 140/2003, Valores paramétricos en agua potable

Capacidad del depósito en m <sup>3</sup>	Número mínimo de muestras al año
<1.000	A criterio de la autoridad sanitaria
>1.000 - <10.000	1
>10.000 - <100.000	2
>100.000	6

Il·lustració 5 Annex V taula A1 a RD 140/2003, freqüència de mostreig en dipòsit de capçalera,

Volumen de agua distribuido por día en m <sup>3</sup>	Número mínimo de muestras al año
<100	A criterio de la autoridad sanitaria
>100 - <1.000	1
>1.000 - <10.000	1 por cada 5.000 m <sup>3</sup> /día y fracción del volumen total
>10.000 - <100.000	2 + 1 por cada 20.000 m <sup>3</sup> /día y fracción del volumen total
>100.000	5 + 1 por cada 50.000 m <sup>3</sup> /día y fracción del volumen total

*Il·lustració 6 Annex V, Taula A1 C, RD 140/2003, freqüència de mostreig en la xarxa de distribució*

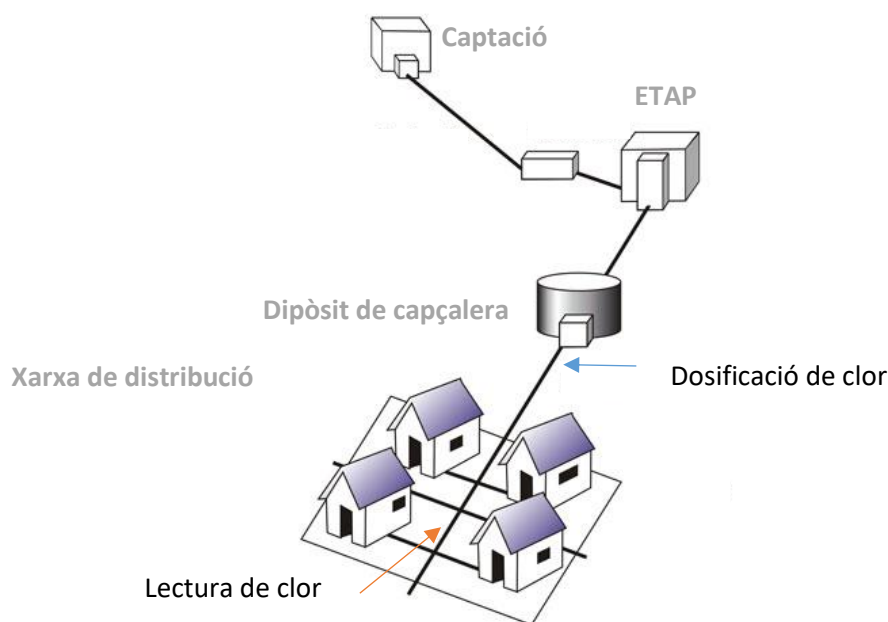
**B. Control en grifo del consumidor:**

Número de habitantes suministrados	Número mínimo de muestras al año
≤ 500	4
> 500 - ≤ 5.000	6
> 5.000	6 + 2 por cada 5.000 hb. y fracción

*Il·lustració 7 Annex V, Taula A1 B, RD 140/2003, freqüència de mostreig en l'aixeta del consumidor*

Com s'observa amb els extractes del Real Decreto 140/2003, la freqüència de mostreig que imposa les autoritats es baixa en front de les variacions que pot sofrir la qualitat de l'aigua al llarg de l'any, per causes naturals, pluja amb alta concentració de terra, creixement d'algues en l'arribada de la primavera, calamarsa, entre d'altres, o bé degut a l'activitat humana, vessaments de productes químics o excés en l'ús d'aquests en etapes de potabilització o depuració, contacte amb aigües fecals, etc. Per tant variacions puntuals o periòdiques de curta durada de la qualitat d'aigua distribuïda, passarien inadvertides per l'autoritat sanitària.

## 6.-Modelització de la planta



*Il·lustració 8, Sinòptic de la planta a caracteritzar*

En la il·lustració 8 es mostra l'esquema genèric del cicle d'aigua potable, des de la font natural fins als punts de consum. L'objecte d'aquest projecte és l'estudi des de la sortida del dipòsit de capçalera (on es proposa el punt d'injecció de desinfectant) fins a un punt a l'interior de la població. On el controlador es troba en el dipòsit de capçalera i la informació enregistrada per la sonda de clor, ubicada en el municipi, es envia a través de *Wifi* o ràdio.

S'utilitza l'entorn de programació Matlab ja que disposa de funcions específiques per a la identificació y verificació de sistemes. Per a l'obtenció del model matemàtic que correspongui a la resposta del sistema. S'han pres experimentalment un conjunt de valors del clor al final del tram de distribució com senyal de sortida del sistema, per a una concentració desitjada del dipòsit concreta com senyal d'entrada al sistema de control, durant dues hores mostrejant en la sortida del sistema cada minut. S'han introduït aquests valors en *Matlab* en forma de dos vectors de sortides del sistema (ppm de clor en la població) i els seus corresponents valors de concentració desitjada de desinfectant a l'entrada al sistema. Un vector de valors de sortides i el corresponent d'entrades, s'utilitzarà per a simular el sistema i els altres dos vectors serviràn per comprobar la precisió del model. L'objectiu és l'obtenció d'una expressió del tipus:

$$C = f(Q, T, L, C_d)$$

On: C és la concentració de clor en la sortida del sistema i  $C_d$  la concentració desitjada.

Q el cabal que circula per la canonada.

T la temperatura del fluid.

L la longitud de la canonada.

La funció generada amb el *software* és per una velocitat, temperatura i longitud concretes. Degut a que les mostres es van prendre durant les hores demanda mitja d'aigua, es consideren aproximadament la mitjana del conjunt de velocitats que s'assoleixen en la xarxa de distribució, s'opta per utilitzar aquesta mitjana ja que es suposa el conjunt de mostres amb una variància reduïda. La canonada de distribució d'aigua potable es troba enterrada de mitjana 80 cm i el dipòsit de capçalera es troba ubicat en un bosc, pel que durant la gran part del dia no rep radiació solar directa. Tenint en compte aquest factors, es suposa que la temperatura de l'aigua no assoleix valors elevats que comportarien un augment en la evaporació de desinfectant, que es considerarà constant.

En la construcció del model matemàtic del sistema, no es contempla l'increment del factor de disminució del clor degut al augmentar el temps d'utilització de la canonada[4].

L'entorn de programació *Matlab* presenta llibreries i funcions específiques per a la identificació de sistemes, les quals seran utilitzades per tal de crear el model de la planta i validar-la.

El primer pas per a la l'obtenció del model del sistema és saber els ordres del numerador i denominador dels coeficients de la funció de transferència. Per poder obtenir la funció de transferència serà necessari agrupar les sortides del sistema amb les corresponents senyals d'entrada a través de la funció *iddata*. La primera agrupació de valors (*paraEstimar*) s'utilitzarà per la creació del model matemàtic, on els paràmetres d'entrada són: la meitat de les sortides mesurades de la planta a les quals se li resta la mitjana d'aquests mateixos valors (per a disminuir l'efecte de punts amb una variància molt gran), les corresponents senyals d'excitació del sistema per a les quals hem obtingut aquelles sortides i finalment el temps de mostreig amb el que s'han pres el conjunt de mostres, en el cas del estudi realitzat cada 60 segons.

El segon conjunt de dades (*ParaValidar*) s'utilitzarà per calcular l'exactitud del model a partir de la entrada al sistema i mesurant la diferència entre la sortida sistema obtingut amb el *Matlab*, amb la mesurada físicament en la planta. Per realitzar aquesta construcció del model i calcular l'exactitud de les prediccions del sistema s'utilitza la funció *arxstruc*, que necessita de paràmetres d'entrada: el conjunt de dades per a generar el model, les dades de comprovació i el nombre de combinacions de pols, zeros i retards del sistema amb els que realitzar la construcció i validació del model.

La metodologia per a l'obtenció del model descrita anteriorment es detalla en la imatge 9, on s'obté una primera aproximació del nombre de pols i zeros necessaris per a obtenir un bon ajust del model a les dades mostrejades.

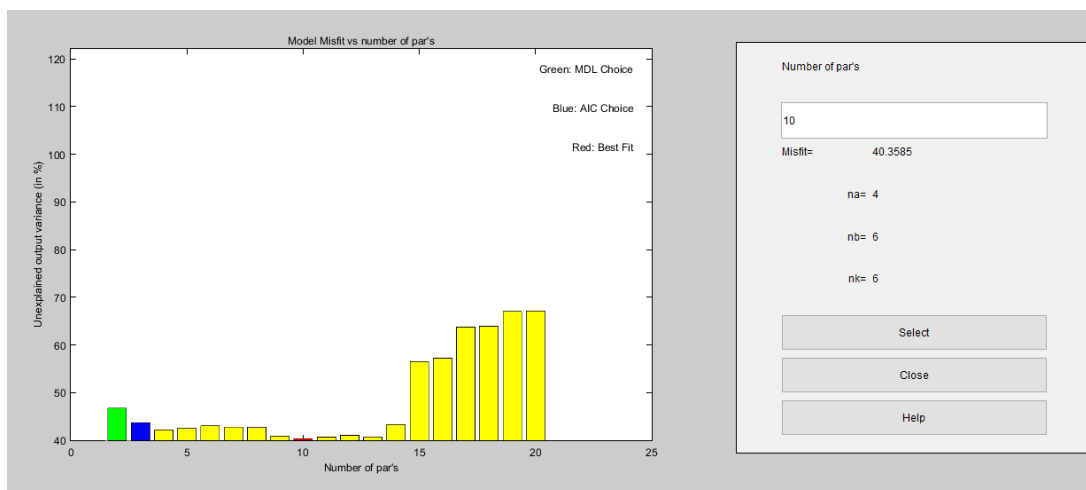
```

NN=struc(1:10, 1:10,1:10); %combinacions de pols, zeros i retard a provar
paraEstimar= iddata(y2(1:60)-mean(y2(1:60)), u2(1:60), 60); %valors per a la construcció del model
paraValidar= iddata(y2(61:120)-mean(y2(61:120)), u2(61:120),60); %valors per a la verificació del model
V=arxstruc(paraEstimar, paraValidar, NN); %Construcció del model per cada un dels valors de pols, zeros i retard.
selstruc(V) %Mostrar valors obtinguts

```

Il·lustració 9, Codi Matlab per a l'obtenció del conjunt de possibles pols i zeros del sistema

Es prendran els valors de pols, zeros i retard com a referència inicial tot i que el sistema no sigui un ARX, ja que no existeixen funcions com aquesta per a altres models com l'ARMAX, Box-Jenkins, Output-Error.



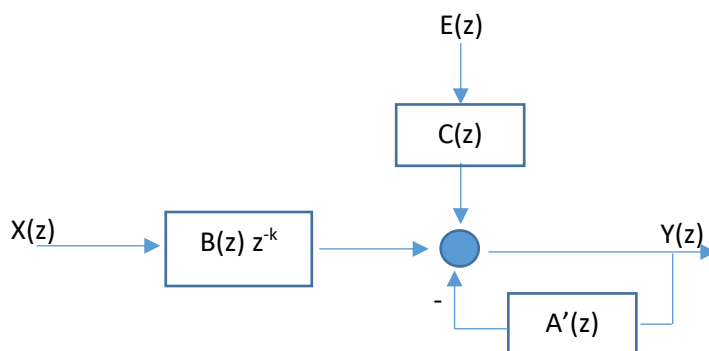
Il·lustració 10, Possibles pols i zeros per a un sistema ARX i l'error respecte als valors de validació

Ens apareixen com a valors remarcats amb una coloració diferent els valors que resulten més òptims a utilitzar segons diferents criteris, amb vermell es minimitza la suma dels quadrats de les diferències entre les dades de sortida de validació amb els del model ARX. En verd s'obtenen els valors segons el criteri de Rissanen, que es basa en criteris estadístics bayesians[7] i finalment en blau s'utilitza el criteri de Akaike, que ofereix una estimació de la informació perduda a causa de la selecció d'un model concret[8].

S'escolleix per a la simulació de la planta els valors obtinguts pel criteri dels mínims quadrats ja que com s'observa en la il·lustració 9 és el criteri amb el que es minimitza l'error del model amb en la sortida, que presenten 4 polos, 6 zeros i un retard de 6.

#### 6.1.-Model ARMAX

Dels diferents estructures per al model de la planta (ARX, ARMAX, BOX-Jenkins, Output-Error) es tria l'ARMAX, ja que es el que presenta un major control sobre qualsevol pertorbació que es pugui introduir al sistema, alhora que presenta una major similitud amb la planta amb un menor nombre d'elements en la funció de transferència com es demostra en l'annex D. Una funció de transferència del tipus ARMAX, és un model autoregressiu amb termes exògens, presenta una estructura de blocs com la que es mostra en la il·lustració 11[9]:



Il·lustració 11, Esquema genèric d'un model ARMAX

Obtenint d'expressió de sortida  $Y(z)$  l'equació 1:

$$Y(z) = \frac{B(z) z^{-k}}{1 + A'(z)} X(z) + \frac{C(z)}{1 + A'(z)} E(z) \quad (1)$$

Per a l'obtenció dels coeficients de A i B, s'utilitzarà la funció de *Matlab armx*, que a partir del nombre de pols, zeros i retard desitjats, és capaç de construir un model que compleixi aquest requisits. Es considera la planta a modelar amb absència de soroll, per tant el terme  $E(z)$  és nul, resultant que la funció de transferència del sistema és tan sols el primer terme de l'equació 1.

Degut a que el model que construeix és un ARX que divergeix del que es vol utilitzar, es pren el valor de zeros, pols i retard com un valor inicial per iterar amb diferents valors d'aquests paràmetres, fins a obtenir una precisió del sistema que es consideri adequada.

Tal i com es pot veure en l'annex E en utilitzar els valors retornats per la funció *selstruc* amb el criteri de la minimització del error quadràtic, s'obté una semblança del model del 77,17%. Ara bé si s'augmenten el nombre de pols l'ajust va augmentant, de la mateixa manera que també ho fa la complexitat del model proposat i el temps de càlcul necessari per part del software. S'observa que a partir del sisè pol, per cada un dels pols que s'afegeix augmenta de forma lleugera la millora en l'ajust del model.

Per tant la configuració final del sistema es realitzarà a partir de 6 pols (na), 6 zeros (nb) i un retard de 6, ja que es amb la configuració que s'obté un millor ajust sense construir un sistema complex amb les dades mostrejades

```
A(z) = 1 - 0.9504 z^-1 - 0.07952 z^-2 + 0.1669 z^-3 - 0.4241 z^-4 + 0.3069 z^-5 + 0.05313 z^-6
B(z) = -0.1072 z^-6 + 0.3525 z^-7 - 0.03496 z^-8 - 0.7371 z^-9 + 0.6417 z^-10 - 0.09275 z^-11

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders:  na=6  nb=6  nk=6
Number of free coefficients: 12
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

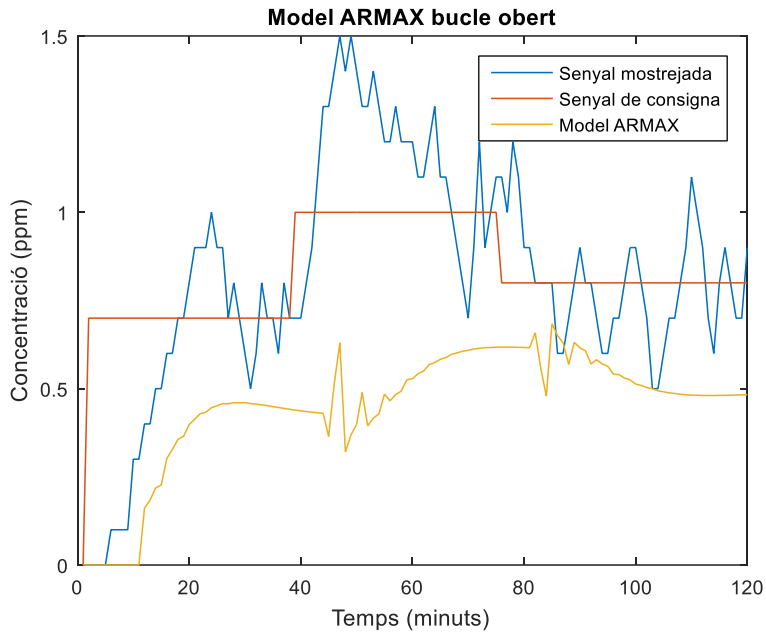
Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 79.11% (prediction focus)
FPE: 0.01043, MSE: 0.008303
```

Il·lustració 12, Exactitud del model proposat segons la funció: *armx*

El terme  $A(z)$  presentat en Il·lustració 12 és equivalent a  $1 + A'(z)$  mostrada en l'equació 1. A partir dels termes obtingut amb la funció *ARMAX* es pot construir la funció de transferència mostrada en l'equació 2.

$$H(z) = \frac{-0,1 z^{-6} + 0,35 z^{-7} - 0,03 z^{-8} - 0,73 z^{-9} + 0,64 z^{-10} - 0,09 z^{-11}}{1 - 0,95 z^{-1} + 0,07 z^{-2} + 0,16 z^{-3} - 0,42 z^{-4} + 0,09 z^{-5} + 0,09 z^{-6}} \quad (2)$$





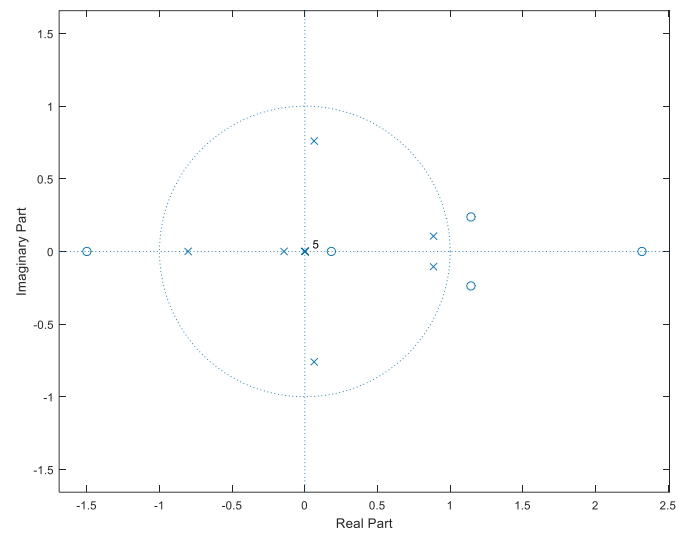
*Il·lustració 13, Sortida del sistema proposat, senyal mostrejada i senyal consigna*

Es mostra en la il·lustració 13 com el model no assoleix l'amplitud necessària per assolir els valors de la consigna, tot i això s'observa com presenta tres estats estacionaris ben diferenciats, això porta a intuir que amb una acció proporcional es podrien assolir valors molt més propers als desitjats. S'observa a més a més l'acció del retard establert anteriorment, com aproximadament 6 minuts després de l'inici d'entrada al sistema es comença a obtenir sortida en el sistema. També es pot visualitzar el sobre pic que es produeix per alguns dels canvis de valor desitjat en la sortida, el més pronunciat és el primer, que s'haurà de tenir en compte alhora de realitzar el control ja que si s'eleva per sobre d'un ppm, l'aigua seria qualificada com a no potable. S'observa en general una resposta lenta de la planta.

$$H(z) = \frac{-0,1 z^5 + 0,35 z^4 - 0,03 z^3 - 0,73 z^2 + 0,64 z - 0,09}{z^5(z^6 - 0,95 z^5 + 0,07 z^4 + 0,16 z^3 - 0,42 z^2 + 0,09 z + 0,09)} \quad (3)$$

En l'equació 3 es presenta el model de la planta proposat amb els exponents de la funció positius, per tal de poder obtenir el conjunts de pols i zeros del sistema.

Es pot observar en el diagrama de pols i zeros de la il·lustració 14 com el sistema obtingut és estable, tan sols presentant 4 pols conjugats, es tindran en especial consideració alhora de realitzar qualsevol acció de control ja que en cas que un pol sortís del cercle unitat, ens trobaríem davant d'un sistema inestable que no es podria garantir la convergència per a un valor en la sortida.



*Il·lustració 14, Pols i zeros del sistema ARMAX obtingut*

## 7.-Sistema de control clàssic

A continuació s'exposarà la resolució de la dosificació de clor a través d'un esquema clàssic de control, mitjançant un llaç de realimentació i un controlador (s'estudiarà si proporcional, integral, derivatiu o combinació dels anteriors) .

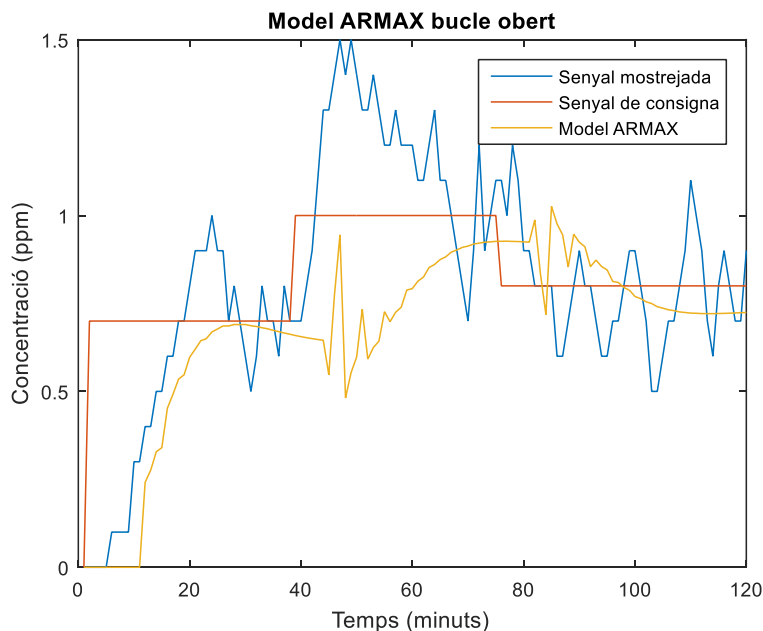
Un cop definida la planta a partir del model *ARMAX* obtingut en l'apartat anterior (equació 3), s'estudiaran dos tipus de controladors, el controlador proporcional, format exclusivament per una constant que servirà per modificar l'amplitud i posició dels pols i zeros, i el controlador proporcional i derivatiu (PD), que s'utilitza per millorar la velocitat de resposta del sistema així com una millor adaptació als canvis en el valor de consigna. No es considera necessari l'estudi amb un controlador integral, ja que de forma genèrica alenteixen la resposta del sistema i resol la problemàtica de l'offset que pugui aparèixer.

### 7.1.-Control proporcional amb bucle obert



Il·lustració 15, Esquema clàssic de sistema de control

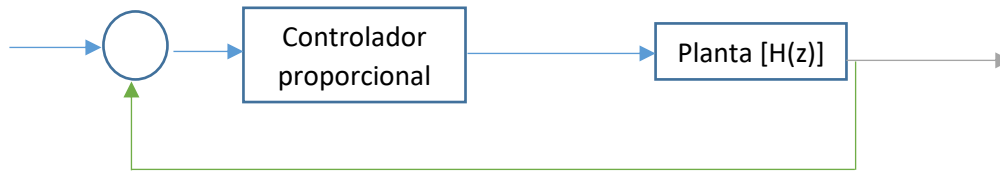
Aquest constitueix el sistema de desinfecció més senzill, representa per exemple una bomba de dosificació que introdueix desinfectant a la planta a un ritme constant a partir de la concentració desitjada establerta per l'operari o per un cabalímetre. Es prova aquesta configuració de sistema amb diferents valors del paràmetre proporcional, per a qualsevol valor de constant proporcional superior a 3,2, s'observa com l'oscil·lació s'apodera del sistema i l'acaba duent a la inestabilitat.



Il·lustració 16, Resposta del sistema amb bucle obert i acció proporcional amb la senyal mostrejada i de setpoint

S'observa una resposta que l'amplificació la converteix en oscil·lant, sense arribar a augmentar de forma significativa el valor mig de la senyal. S'acaba concluint que aquest tipus de controladors constitueixen una bona primera aproximació a la solució del problema sense arribar-lo a resoldre completament.

## 7.2.-Control proporcional en bucle tancat

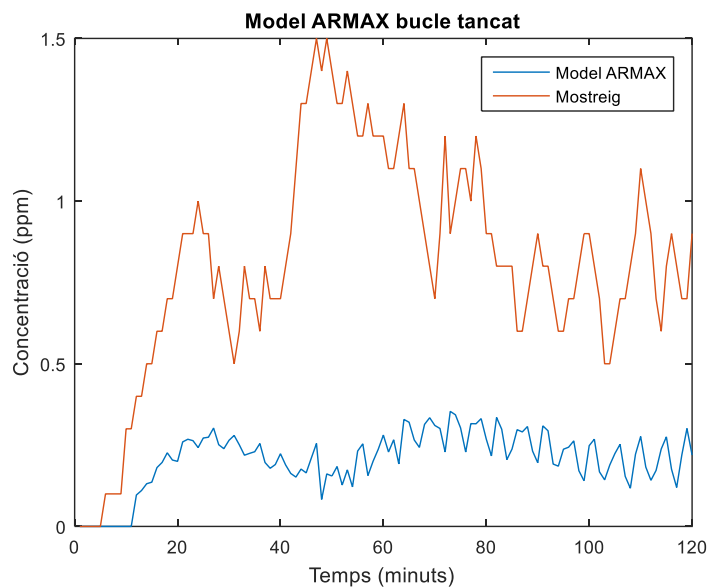


Il·lustració 17, diagrama de blocs control realimentat

Aquest és el tipus de control instal·lat actualment en una àmplia gama dels sistemes de cloració, on es realitza una lectura de l'aigua i es dosifica de forma proporcional de l'error respecte la concentració desitjada. Per a l'obtenció d'un sistema de control que s'autocorregeixi es procedeix a tancar el llaç de control, i s'afegeix una constant per realitzar un primer intent d'ajustar al màxim el model al sistema.

$$H_1(z) = \frac{K B(z)}{A(z) + K B(z)} \quad (4)$$

On A i B són els polinomis obtinguts en l'apartat de la modelització de la planta i K serà un valor amb el que s'iterarà per tal d'obtenir una sortida el més semblant possible a la consigna.



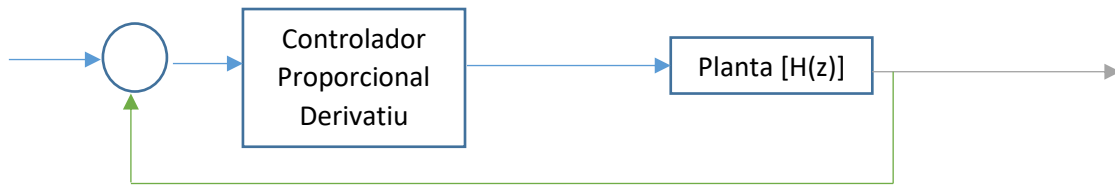
Il·lustració 18, Sortida del sistema amb bucle tancat comparat amb la senyal mostrejada

En realitzar el tancament del llaç de control es pot observar com la resposta disminueix de forma dràstica la seva amplitud i perd fins i tot la diferenciació dels tres estats estacionaris. Això es degut a que el sistema ja presentava una funció de transferència propensa a la inestabilitat, amb dos pols conjugats propers al cercle unitari. El model presentava zeros ubicats fora d'aquesta regió unitària, que en el moment de realitzar la realimentació han entrat en la funció de transferència com a pols, introduint irremeiablement la inestabilitat al sistema de control.

En la il·lustració 18 la constant proposada (K) és 1,2, s'ha representat aquest valor perquè és el que ubica els pols del sistema en el límit de la estabilitat, per a qualsevol valor superior del paràmetre K, el sistema es torna inestable i no s'aconsegueix la convergència per a cap valor.

### 7.3.-Control proporcional i derivatiu en bucle tancat

Degut al mal resultat en els anteriors models presentats, s'opta per introduir en el controlador una part derivativa, intentant d'aquesta forma millorant la velocitat de resposta del sistema a la vegada que s'aposta per mantenir la part proporcional degut als bons resultats aconseguits en bucle obert. Aquest tipus de sistema constituïria un model de control molt similar a l'anterior, dosifica en funció el valor mostrejat amb el desitjat i a més tindria en compte la previsió de variació de la sortida.



Il·lustració 19, diagrama de blocs amb controlador PD

Per a la construcció de la part derivativa del controlador, es basa en la definició de la pròpia derivació, om realitzant les corresponents transformades al domini discret s'acaba obtenint[9]:

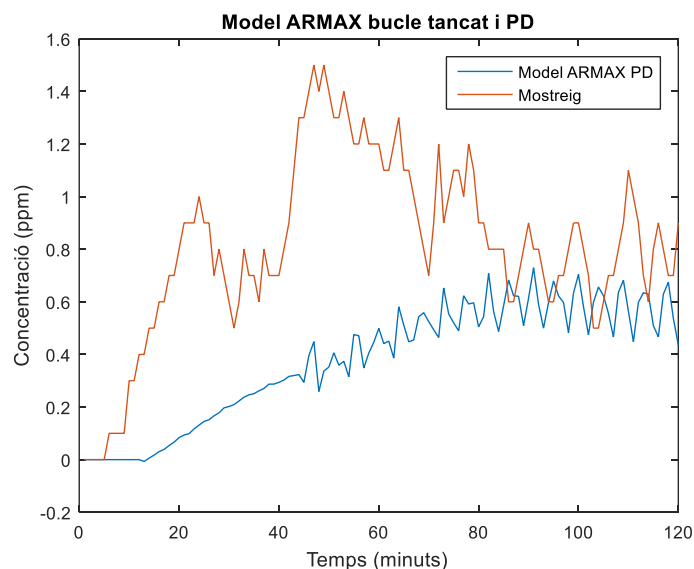
$$y(nt) = \frac{x(nT) - x(nT - T)}{T} \quad Y(z) = \frac{X(z)(1 - z^{-1})}{T} \quad (5)$$

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(1 - z^{-1})}{T}$$

Afegint el terme derivatiu a la funció de transferència s'obté:

$$H_2(z) = \frac{B(z)(K + K_D(1 - z^{-1}))}{A(z) + B(z)(K + K_D(1 - z^{-1}))} \quad (6)$$

Obtenint per a l'entrada presentada en els anteriors cassos:



Il·lustració 20, Resposta del sistema en bucle tancat i control PD comparat amb la senyal mostrejada

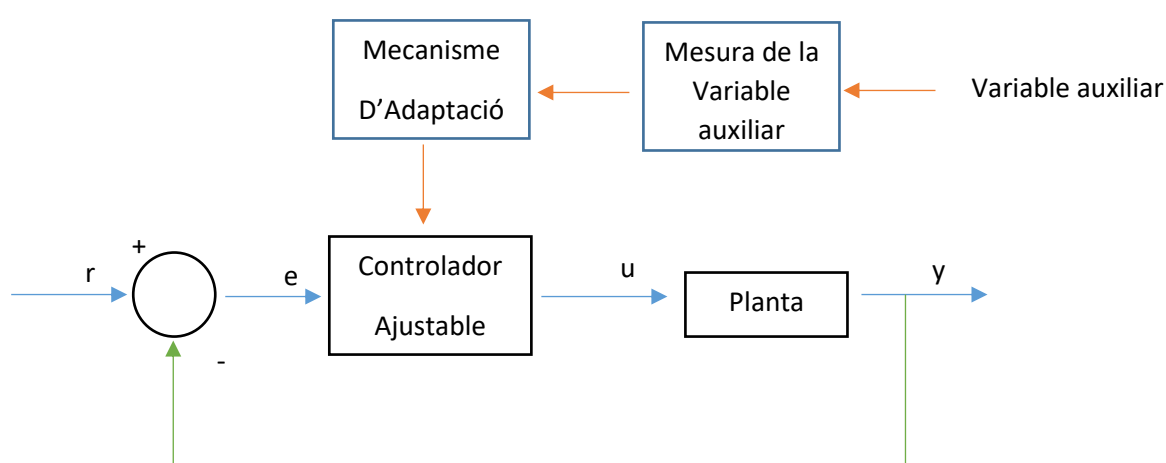
Afegint el terme derivatiu en la funció de transferència, il·lustració 20, s'observa un notable canvi en la sortida, tot i que al contrari del que s'esperava la resposta es torna força més lenta en comparació amb el mateix sistema en bucle obert. El sistema es mostra altament oscil·latori sense però arribar a la inestabilitat. Amb un temps d'acció força elevat, en la sortida s'acaba obtenint una resposta similar a la mostrejada. Tot i això, es torna a concloure que no es un model vàlid per a poder realitzar el control de la planta, ja que la sortida resulta força distant tant del model i com de la consigna.

## 8.-Sistema de control adaptatiu

### 8.1.-Models de Control adaptatiu

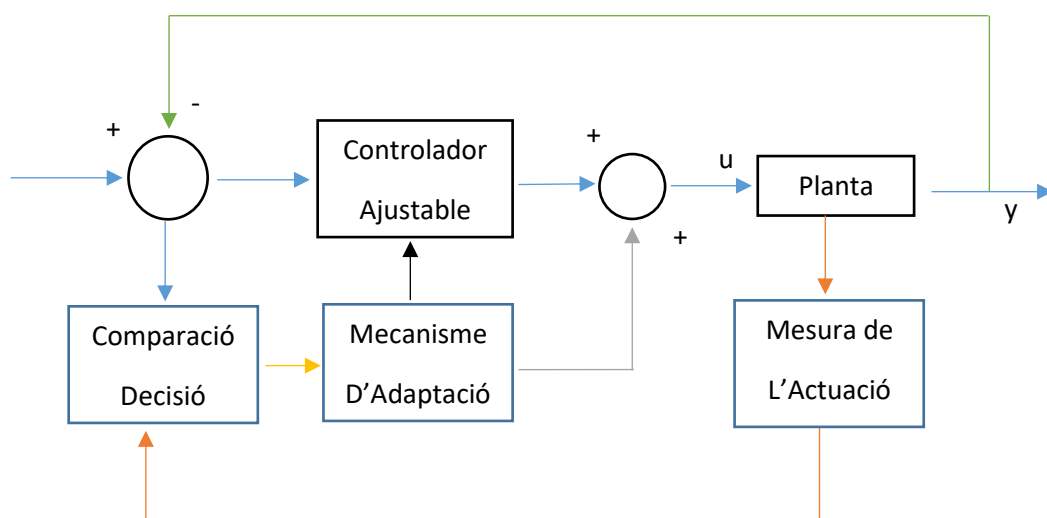
Es defineix com control adaptatiu un tipus especial de control no lineal en el que l'estat del procés pot ser separat en dues escales de temps que evolucionen a diferent velocitat. L'escala lenta correspon als canvis dels paràmetres per tant la velocitat amb la qual els paràmetres del regulador son modificats, i l'escala ràpida correspon a la dinàmica del bucle ordinari de realimentació. És a dir, són sistemes de control que presentaran dos bucles de realimentació, la primera o lenta servirà per variar el paràmetres interns del propi controlador mentre que la segona realimentació és la pròpia del sistema.[11]

Podem diferenciar de forma genèrica dos tipus de controls adaptatius segons la existència o no de realimentació en la branca de paràmetres del controlador.



Il·lustració 21, Diagrama de blocs controlador adaptatiu en bucle obert

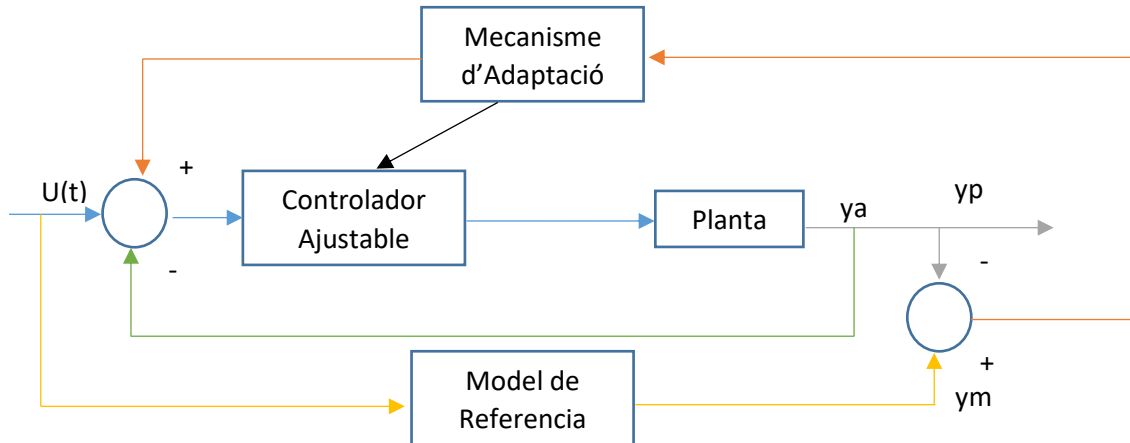
En aquest tipus de sistema de control observem com es necessari introduir una variable externa, normalment la sortida d'un altre sistema de control, per produir canvis en els paràmetres propis del controlador ajustable.



Il·lustració 22, Diagrama de blocs controlador adaptatiu amb llaç de realimentació

Segons com hagin sigut dissenyats els podem classificar en dos grans grups, model de control adaptatiu amb model de referencia i el regulador auto-ajustable descrit en l'annex B. La base d'aquest dos algoritmes de control és que per a qualsevol valor que prenguin els paràmetres de la planta i les perturbacions, existeix un controlador lineal amb una complexitat fixada, tal que planta i controlador compleixen amb els valors de consigna.

## 8.2.-Model de control adaptatiu amb model de referencia (MRAC)



Il·lustració 23, Diagrama de blocs control adaptatiu amb model de referencia

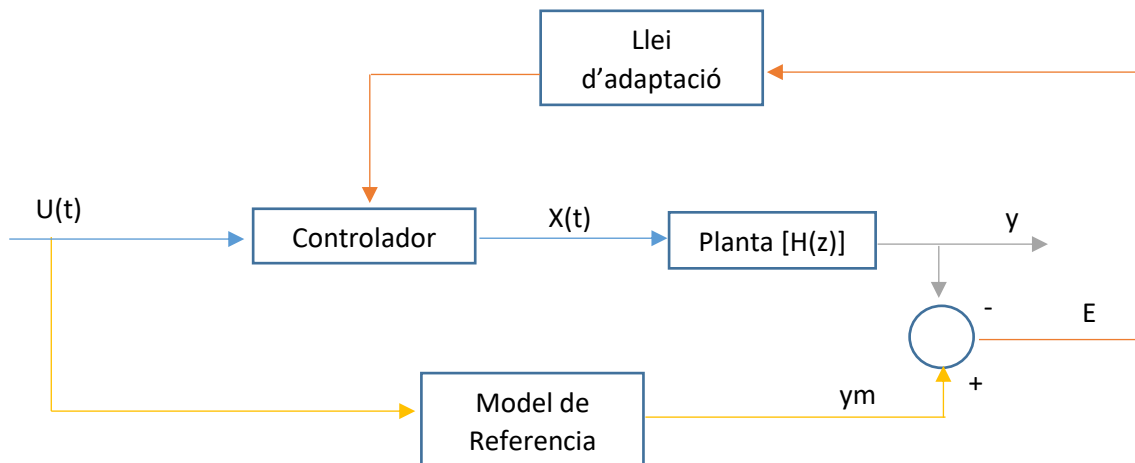
En el esquema pot veure's un controlador primari que s'utilitza per obtenir el comportament en bucle tancat (utilitzat àmpliament en el control convencional). D'altra banda els paràmetres del procés poden ser desconeguts i o variables, per tant esdevé d'una alta complexitat desenvolupar un controlador que sigui capaç de respondre en un ampli rang de situacions.

Am el model MRAC, la resposta desitjada a una senyal d'entrada al procés,  $U(t)$ , s'especifica com un model de referència, podent ser aquest model de referència la pròpia senyal d'entrada al procés o bé una altra. El mecanisme d'adaptació compara la sortida de la planta,  $y_p$ , i la sortida del model de referència,  $y_m$ , i calcula els paràmetres adequats de forma que la diferència entre ells tendeixi a ser zero.

En el esquema de la figura 23, el modelo de referencia es troba ubicat en paral·lel amb el procés. Aquest esquema es el més habitual, encara que existeixen diverses variants, com ubicar-lo en sèrie o bé una combinació sèrie-paral·lel.



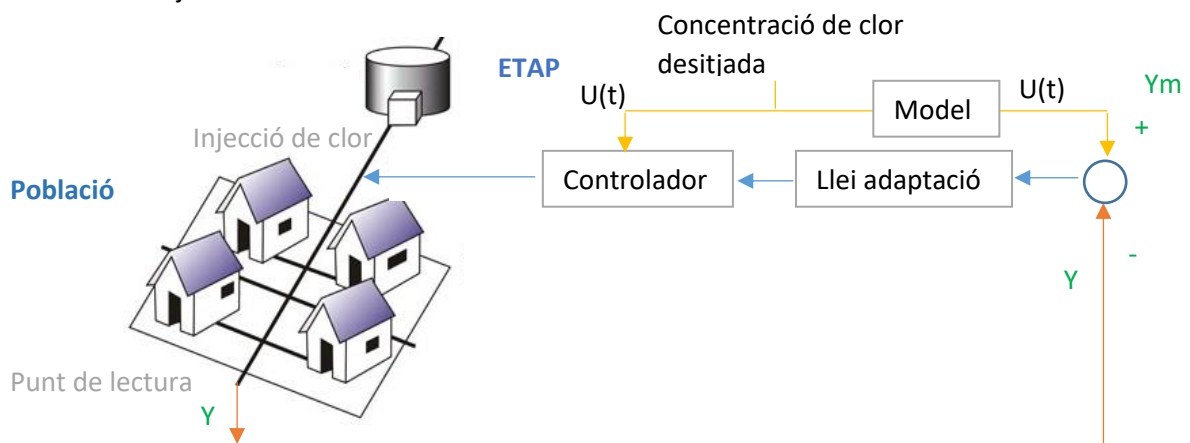
### 8.3.-Proposta de control adaptatiu



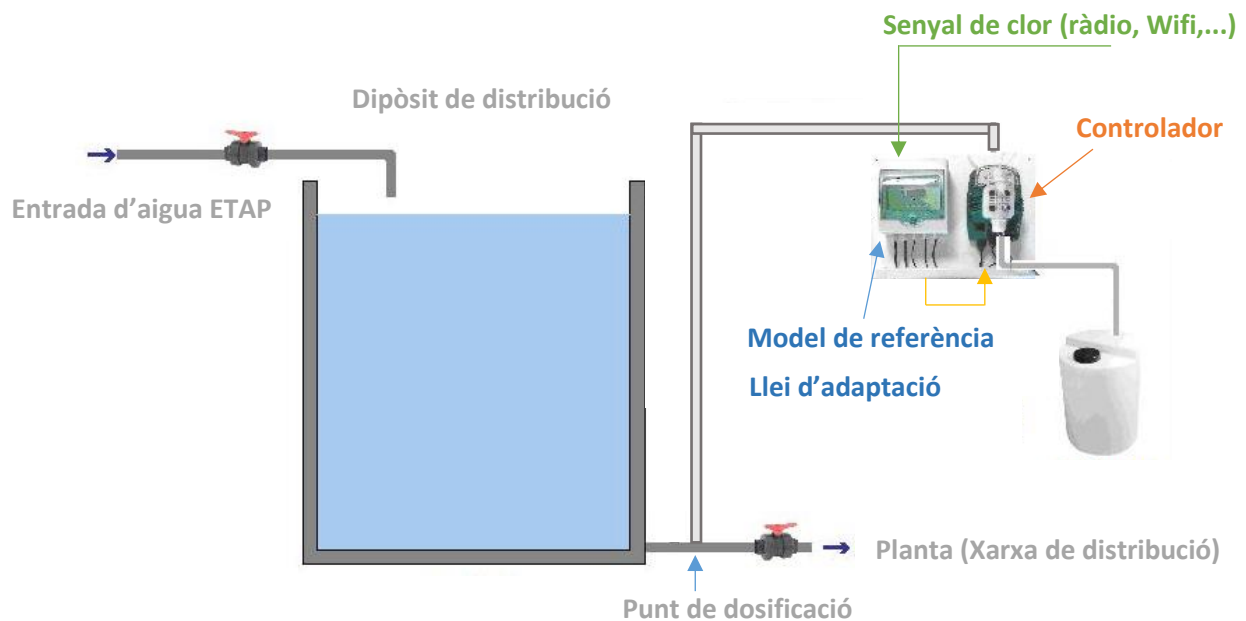
Il·lustració 24, Diagrama de blocs del sistema de control proposat

Per a la realització del control del hipoclorit s'opta per un model de seguiment de referència, ja que es presenta una major senzillesa per a la construcció de tot el sistema de control. Degut a la bona resposta en bucle obert de les plantes formulades en l'apartat de caracterització de la planta, en aquesta configuració es tria no realitzar realimentació, i serà la pròpia llei d'adaptació qui garantirà la estabilitat i els bons resultats en la sortida de la planta.

S'observa en el diagrama de blocs de la il·lustració 24 l'estructura proposada per la realització d'aquest control adaptatiu, on  $U(t)$  és la concentració d'hipoclorit sòdic desitjada en el punt de mostreig (ubicat en la població), la planta serà la xarxa de distribució d'aigua potable del municipi, el controlador ajustable, responsable de la l'addició de desinfectant a la planta, i finalment la llei d'adaptació que serà la responsable de introduir canvis en els paràmetres del controlador de la planta, per tal de que s'ajusti de la forma més fidel possible al model de referència desitjat.



Il·lustració 25, Representació del model diagrama de blocs



Il·lustració 26, Esquema físic sistema de control adaptatiu

### 8.3.1.-Senyal de consigna $U(t)$

És la dada introduïda en el procés de control per tal d'establir el nivell de clor desitjat en l'aigua potable distribuïda, en el punt de consum (població). Tot i que no hi ha un valor establert a nivell normatiu, de forma genèrica s'utilitza una concentració de 0,7 ppm. A priori aquest valor és constant al llarg de l'any, ara bé en una majoria de municipis que presenten com a punt de captació principal una bassa, en la primavera i estiu degut a la major incidència dels rajos solars, aquests recintes d'aigua sense tractar presenten una alta proliferació d'algues, fet que acaba repercutint en una coloració i olor en l'aigua. Per aquest motiu s'augmenta la dosificació de desinfectant amb l'únic objectiu d'eliminar l'efecte d'aquests organismes en l'aigua potable.

### 8.3.2.-Model de referencia

El model de referencia és la base del sistema de control, ja que serà la guia a seguir per part del sistema, com es pretén que es comporti la planta. Aquest comportament de la planta no es altre que la propi valor de consigna descrit anteriorment,  $U(t)$ . Aquest bloc de valor unitari representa la realimentació del sistema en un sistema de control clàssic, ja que s'utilitza per obtenir la funció d'error que serà la responsable de la variació dels paràmetres del controlador.



Il·lustració 27, carcassa d'un controlador amb acció proporcional estàndard

En els sistemes actuals aquesta informació és donada al sistema de control a través d'una botonera per part del operari tal a través d'un equip com el que es mostra en la imatge 27. La forma d'introduir el valor de consigna del clor es proposa que sigui amb el mateix format, a través d'un menú mostrat per una pantalla i amb botons per tal de poder modificar els paràmetres.

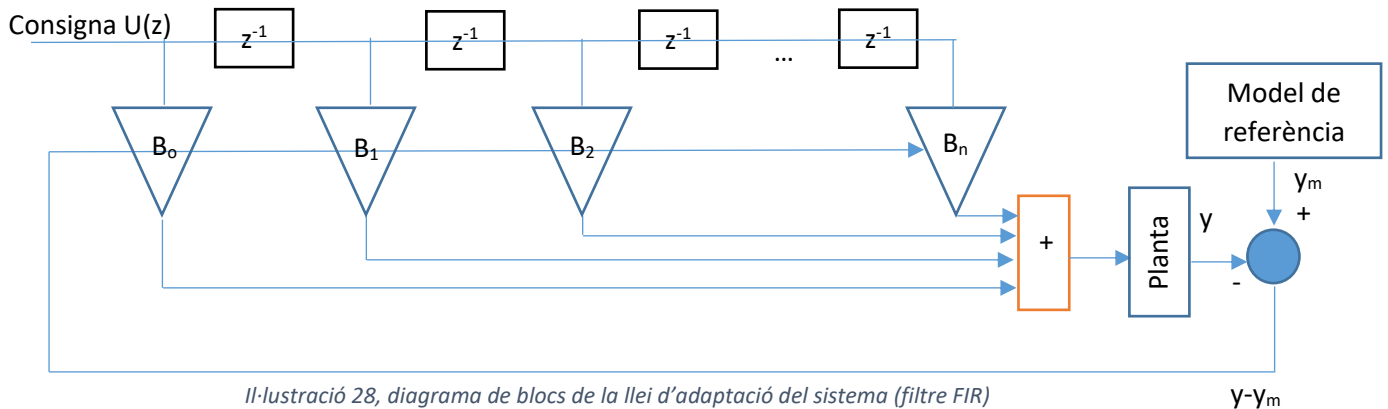
### 8.3.3.-Llei d'adaptació i controlador

Es pot observar que la senyal d'entrada segons el diagrama de blocs mostrats anteriorment és:

$$E = y_m - y \quad (7)$$

Es pot observar que amb el model de planta escollit, amb 6 pols i 6 zeros, per aconseguir una sortida estable i que s'aproximi al objectiu en el règim estacionari, es necessari la cancel·lació dels pols, d'aquesta manera en estat estacionari tan sols tindrà efecte el numerador de la funció de transferència i ho farà a mode de constant proporcional.

Per a realitzar aquesta funció es proposa un controlador lineal adaptatiu, que es basa en un filtre FIR. L'adaptació dels coeficients es realitza a través de la resta de la sortida d'aquests amb la senyal de referència, com mostra l'esquema a continuació.



On els valors de  $B_i$  s'actualitzen després de cada mesura en la sortida segons l'expressió obtinguda a partir de l'algoritme del valor quadràtic mitjà mínim[9]:

$$B_{i(n+1)} = B_{i n} z^{-1} + 2 \mu (Y - Y_m) U(z) \quad (8)$$

On

$\mu$  és un constant a determinar per garantir l'estabilitat del sistema (annex G)

$E$  és l'error del sistema respecte la senyal desitjada.

$U$  és la senyal d'entrada al sistema en aquell moment.

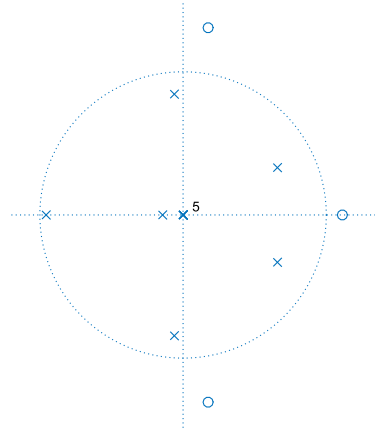
Aquest conjunt de blocs constituïria el controlador que permetria la dosificació a les bombes de desinfectant, el terme  $B_{i(n+1)}$  representa les pròpies bombes de dosificació del sistema, ja que és l'únic element capaç de fer variar la concentració de clor en la distribució.

En el cas que es mantingués el punt de consigna estable un temps suficient, el error assoliria valors de 0, ja que la sortida del sistema seria la pròpia senyal desitjada. Per tant en l'estructura del controlador s'observa com es mantindrien els valors de  $B$  constants e invariants al llarg del temps, fins que el valor del error tornés a ser diferent de zero.

Com es demostra en l'Annex G, per a la millor resposta en la sortida de la planta, en controlador ha de presentar 3 paràmetres. Al afegir-ne més el sistema es torna més oscil·latori, per contra en reduir el nombre el sistema es torna més lent.

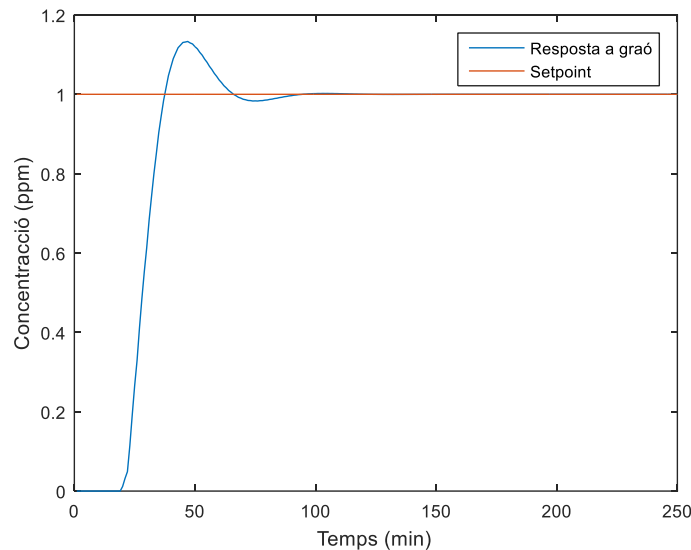
#### 8.3.4.-Exemples d'execució

Un cop definit cada un dels elements del sistema de control es procedirà a realitzar el seu estudi, amb diferents senyal per comprovar el seu funcionament per a finalment comparar-lo amb els resultats del apartat de control clàssic.



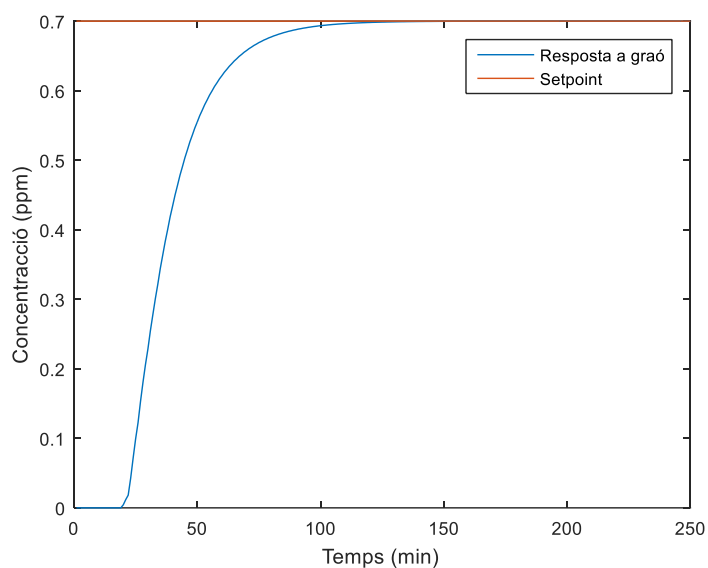
Il·lustració 29, diagrama de pols i zeros del sistema en l'inici

En la il·lustració 29, s'observa la representació dels pols i dels zeros de la planta en l'inici de les simulacions, quant el controlador encara no està pròpiament constituït, ja que en la definició en *Matlab* s'han definit amb un valor inicial de zero, que a mesura que vaguin transcorreguen les iteracions del algoritme començaran a variar en funció del error de la sortida del sistema respecte al model que ha de seguir. Es negligeix la sortida del sistema fins que tots els paràmetres del controlador reben senyal no nul·la.



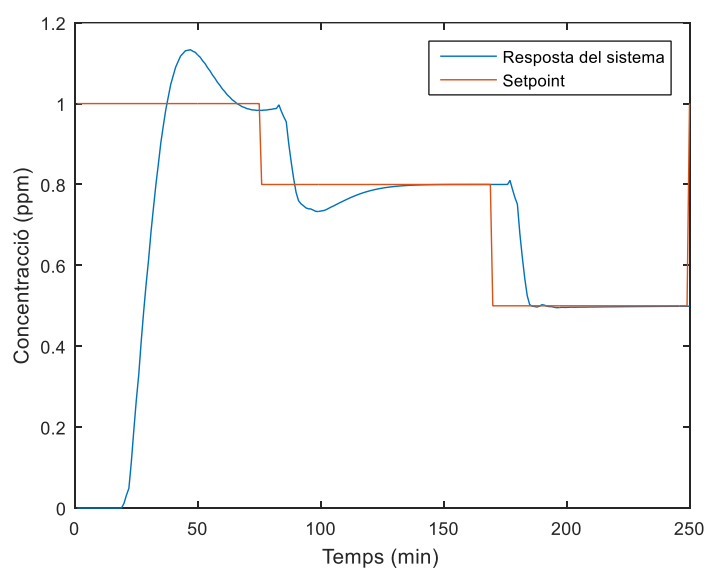
Il·lustració 30, resposta del sistema a un graó unitari

La primera prova del sistema de control es realitza amb un escaló de valor unitari, i s'observa una resposta molt exacta i amb un interval de temps acceptable, es pot observar com la sobre oscil·lació que presenta el sistema es forà petita, es manté proper al 0,1 respecte la senyal de consigna i durant un període curt de temps, al voltant dels 15 minuts. Un cop transcorregut aquest règim transitori que dura al voltant d'una hora, el sistema es manté segons el punt de consigna sense cap variació apreciable.



*Il·lustració 31, resposta del sistema a graó d'amplitud 0,7*

La segona prova al sistema es realitza a un altre graó, en aquest cas però amb valor de 0,7 (concentració estàndard no oficial per a l'aigua de distribució). En aquest cas s'observa com la resposta no presenta cap oscil·lació, tot i això la velocitat de la resposta continua essent acceptable. S'observa com novament un cop assolit el règim estacionari la resposta es manté invariant i constant amb el valor seleccionat de consigna.



*Il·lustració 32, resposta de sistema a un graó de diferents amplituds*

Finalment, per comprovar la capacitat del sistema a adaptar-se als canvis de senyal de consigna, i per tant també de model de referència, se li aplica un graó que va variant en el temps. En el primer tram de la resposta, s'observa la mateixa sortida que presentava el sistema en la primera simulació, ara bé en el punt que estava proper a assolir el règim transitori se li varia la senyal de consigna, en qüestió de minuts el sistema es reajusta per poder proporcionar la concentració de clor sense produir sobre oscil·lacions que podrien posar en perill la salut dels consumidors. En la darrera modificació de la consigna s'observa com ràpidament aconsegueix assolir la quantitat de clor desitjada, aquest cas amb una sobre oscil·lació pràcticament nul·la.

## 9.-Conclusions

El primer objectiu que es va fixar en el treball va ser la modelització de la planta a estudiar a partir d'un model que fos el més fidel possible a la realitat defugint de models complexos. A partir de les premisses de partida establertes, es construeix un model amb 6 pòls i 6 zeros, amb el qual s'obté una resposta que es considera suficientment semblant i un grau de dificultat acceptable.

Un cop obtinguda la planta s'estableix un sistema de control clàssic, basat en accions correctives invariants en el temps i el tancament del llaç de realimentació. S'ha pogut demostrar en l'apartat corresponent la ineficàcia d'aquest mètode, obtenint millors resultats per a plantes en bucle obert que en plantes que presentaven llaç de realimentació. Cap dels diferents controladors exposats en aquest apartat de control clàssic ha pogut mantenir el sistema dintre d'un marge d'error tolerable. S'ha pogut demostrar per tant la bona resposta que presenta un sistema amb control directe modificat a través una constant proporcional. (Algoritme implementat en la majoria de sistemes de cloració actualment).

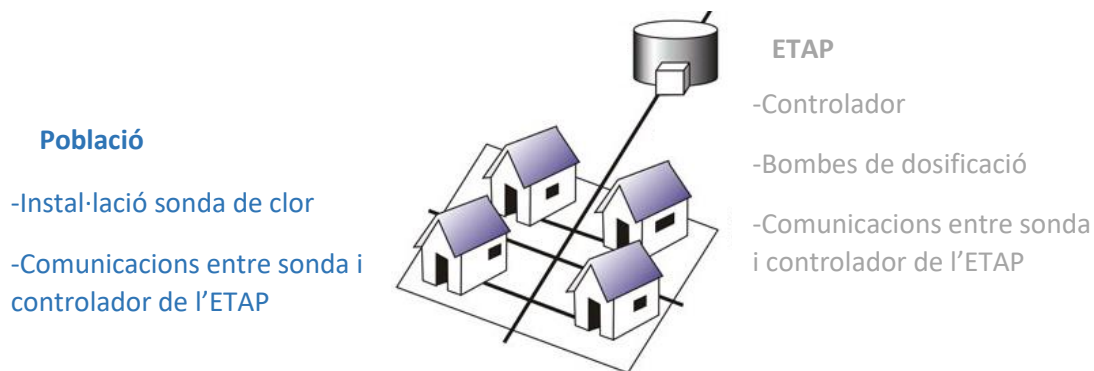
Degut a aquesta falta de solucions proporcionades pels sistemes de control clàssics, s'opta per proposar un sistema de control adaptatiu que millori la resposta que ofereix el sistema anteriorment estudiat, planta en bucle obert amb un paràmetre proporcional. S'escolleix una estructura de MRAC . Amb el model de referència idèntic a la concentració desitjada i la llei d'adaptació dels paràmetres del controlador, es demostra una resposta molt més exacta que per qualsevol dels altres controls estudiats anteriorment. El controlador es avalua amb diferents concentracions de desinfectant desitjades al final de l'etapa de distribució que aconsegueix assolir amb un interval de temps adequat.

Aquest sistema de cloració presenta una avantatge respecte els sistemes de dosificació actual, tan sols s'introdueix al sistema la quantitat de clor necessària i només quan hi ha demanda d'aigua, reduint considerablement la dosificació en períodes de menor consum. Ja que no s'obliga, com es realitza en l'actualitat, al sistema a mantenir una concentració de clor alta en tot el dipòsit de distribució en tot moment. Caldrà però mantenir una certa quantitat de desinfectant dissolta en l'aigua a fi d'evitar el creixement microbiològic a l'interior del dipòsit, en especial durant els períodes de menor consum.

Totes les ETAPS presenten una dosificació en la sortida just abans de l'arribada al dipòsit de capçalera, per tant una proposta de solució es forçar la filtració durant un temps en aquests períodes de consum més baix.

Les modificacions físiques per a la implementació del nou sistema són les que segueixen: implementació del software, podria estar ubicat en la carcassa del actual analitzador, aprofitant així la botonera per introduir el valor desitjat de clor. En la zona de l'ETAP finalment seria necessària la instal·lació de 3 bombes de dosificació de clor, actualment en disposen tan sols d'una.

En el nucli de població, es necessària l'instal·lació de la sonda de lectura de clor en el punt designat a l'interior de la població i la corresponent comunicació a través de Wifi, ràdio etc.



*Il·lustració 33, modificacions al sistema de cloració*

### **Propostes futures:**

La estructura de control presentada obre la porta a modificacions que millorarien la eficiència de la dosificació de desinfectant dels sistemes de distribució amb un sol dipòsit de capçalera:

Introduir el cabal com a paràmetre del sistema, a través de la instal·lació d'un cabalímetre en un punt proper al del nucli de població (per tenir en compte fins hi tot possibles addicions de cabal en la canonada).

Possibilitat d'un control anàleg per al pH de l'aigua, indicador que fa variar l'eficàcia del hipoclorit sòdic com a desinfectant, amb la corresponent dosificació de productes químics correctors.

Es planteja aquest estudi com un punt de partida per a poder exportar el model de planta per a distribucions d'aigua més complexes, on entren en joc varis dipòsits d'abastament (dipòsits de regulació i de cua) o la distribució es realitzi en forma de mallada (com en els grans nuclis de població), on s'haurien d'utilitzar diferents sondes ubicades al llarg del recorregut de distribució d'aigua potable i segurament s'haurien de realitzar dosificacions intermèdies.

## 10.-Bibliografia i referències

- [1] Ahmed Eyman F i Albelraham Ali M, "Design of a control panel for drinking water treatment plant" International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME) Volume 1, Issue 3 (2013) ISSN 2320-4052; EISSN 2320-4060, pàgina 200 a 203.
- [2] Kumar Satheesh J, Poongodi P i Balakumaran P, "Artificial Intelligence Based Alum Dossage Control I Water Treatment Plant" Vol 5 No 4 Aug-Sep 2013, ISSN : 0975-4024, pàgina 3344-3305
- [3] Gowtham.R , Varunkumar.M.C i Tulsiram.M.P "Automation in Urban Drinking Water Filtration, Water Supply Control, Water Theft Identification Using PLC and SCADA and Self Power Generation in Supply Control System", International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE) Volume 3, Issue 7, July 2014, pàgina 689 a 703
- [4] A. O. Al-Jasser, Pipe Service Age Effect on Chlorine Decay in Drinking-Water Transmission and Distribution Systems. Soil, Air, Water 2011, 39 (9), pàgines 827–832
- [5] Guidelines for drinking-water quality, 2nd ed. Vol.2. Health criteria and other supporting information. World Health Organization, Geneva, 1996.
- [6] Real Decreto 140/2003 BOE núm 45, "Por los que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano". Pàgines 7228-7245
- [5]Amerongen J. van "MRAS Model Reference Adaptive Systems" Journal A, volume 22, no 4 (1981) pàgina 192-199.
- [6]Whitaker .P. et al. : "Design of a model reference adaptive system for aircraft", MIT Instrumentation Laboratory, Report R-164 (1958).
- [7]Caballero Díaz F.F., "Selección de modelos mediante criterios de información en análisis factorial. Aspectos teóricos y computacionales." Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 2011.
- [8]Solera R.A. DEPARTAMENTO DE "INVESTIGACIONES ECONÓMICAS DIE-NT-07-00" Banco Central de Costa Rica, Divisió Económica, desembre, 2000
- [9]Clarià Sancho F. "Identificación de sistemas. Control Adaptativo" Escola Politècnica Superior 2015.
- [10]Clarià Sancho F. "Transformada Z Sistemas realimentados discretos Filtrado digital" Escola Politècnica superior, revisió 2014/2015 pàgina 60-65.
- [11] Rodríguez Rubio i López Sánchez "Control adaptativo y robusto", Universidad de Sevilla, serie ingeniería, número 9, 1996.



## Bibliografia adicional

M. MARTÍNEZ, L. GÓMEZ, A. J. SERRANO, J. VILA, J. GÓMEZ "FILTROS DIGITALES" Universitat Politècnica de València, Departament d'Electrònica, 2009-2010.

Landau I.D. "Adaptive Control –The model reference Approach", Marcel Dekker INC, New York and Basel (1979).

Landau I.D. "A survey of model reference adaptive techniques-Theory and applications" Automatica, 10, (1973) pàgines 353-379.

Wang Z. Polycarpou M.M, Uber J.G., Shang F. "Adaptive Control Water in Water Distribution Networks" Control Systems Technology. IEEE Transactions on 14(2006) pàgines 149-156.

R. Mau, P. Boulos, R. Bocock, "Modelling Distribution Storage Water Quality" Applied Mathematical Modelling, Vol. 20, Issue 4, 1996, pàgines 329-338.

L.M. Zierolf, M.M Polycarpou, J.G. Uber "Development autocalibration of an input-output model of chlorine transport in drinking water distributions systems" IEEE Transactions on. 6 (1998) pàgines 543-553.

L.A. Rossman, P.F. Boulos, I T. Altman. "Modelling chlorine residuals in drinking-water distribution systems". Journal of Environmental Engineering. 120(5), 1994, pàgines 803-820.

Wang Z. Polycarpou M.M, Uber J.G., Shang F. "Adaptive Periodic Control for Chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Networks" Decision and control, 2001. Proceedings on the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on. 5(2001) Volume 5, pàgines 4069-4174.

Wang Z "Adaptive Control in drinking water distribution network" tesis doctoral per University of Cincinnati 2002.

Bull R.J. "Health effects of drinking water disinfectant by-products", Environ Sci. Technol 16(1982)554A-559A.

Clark R, Rossman L., Wymer L. "Modelin Distribution System Quality. Regulatory Implications" J.WaterResour.Plann.Manage. 121(1995) pàgines 423-428.

Boccelli D., Tryby M., Uber J., Rossman L., Zierolf M. Polycarpou M. "Optimal Scheduling of Booster Desinfection in Water Distribution Systems" J.WaterResour.Plann.Manage. 129 (2003) pàgines 99-111.

Landau I.D. "Algorithms for discrete time model reference adaptive systems", Proceedings 6<sup>th</sup> IFAC World Congress, Boston /Cambridge, Mass. U.S.A. (1975).

Hipoclorit sòdic:

Lennetech(1998-2017),Lennetech, fabricant de desinfectants.

<http://www.lennetech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-hipoclorito-de-sodio.htm>





**Article 9. Substàncies per al tractament de l'aigua:**

1.- Qualsevol substància o preparat que se li afegeixi a l'aigua destinada al consum humà haurà de complir la norma UNE-EN corresponent per a cada producte i vigent en cada moment. (annexII)

2.- Les substàncies o preparats que a data d'entrada en vigor d'aquesta disposició estiguin essent comercialitzats tindran un termini d'un any per a complir una de les normes UNE-EN que li afectin.

3.- Sense perjudici de la disposició anterior, tota substància o preparat que se li afegeixi a l'aigua destinada al consum humà i o per a indústria relacionada amb aquesta, hauran de complir amb el presentat en el Reial Decret 1054/2002 de 11 de octubre, mitjançant el qual es regula el procés d'avaluació per al registre, autorització i comercialització de biocides o en el Reial decret 363/1995, del 10 de març, pel qual s'aprova el Reglament sobre la notificació noves i classificació, envasat i etiquetatge de les substàncies perilloses o en el Reial Decret 1078/1993, de 2 de juliol, per el qual s'aprova el Reglament sobre la classificació, envasat i etiquetatge de preparats perillosos i en el Real Decret 1712/1991, 29 de novembre, sobre el Registre general sanitari d'aliments o qualsevol altra legislació que es pogués aplicar.

**Article 10. Tractament per a la potabilització de l'aigua per a consum humà:**

1.- Quan la qualitat de l'aigua de captació tingui una terbolesa superior a la de 1 unitat Nefelomètrica de Formacina (UNF) com a mesura anual, s'haurà de sotmetre com a mínim a una filtració per sorra, o algun altre element apropiat, a criteri de la autoritat sanitària, abans de desinfectar-la i distribuir-la a la població. De la mateixa manera, quan existeixi un risc per a la salut, encara que els valors mitjos siguin inferiors a 1UNF, l'autoritat sanitària podrà requerir, en funció de la valoració del risc existent, la instal·lació d'una filtració prèvia.

3.- Els processos de tractament de potabilització no transmetran al aigua substàncies o propietats que contaminin o degradin la seva qualitat i suposin el incompliment dels requisits exposats en l'annex I i un risc per a la salut de la població abastida, ni es podrà produir directa o indirectament la contaminació o deteriorament de l'aigua superficial o subterrània destinada a la producció de l'aigua de consum.

**Article 11. Dipòsits i cisternes per a l'aigua destinada a consum humà:**

1.- Els dipòsits públics o privats, fixes o mòbils de la xarxa d'abastament, de distribució o d'instal·lacions interiors i cisternes per a aigua de consum humà hauran de complir amb l'exposat en l'article 14. Qualsevol dipòsit s'haurà de situar per sobre del nivell del clavegueram, estan sempre tapat i dotat d'un desaigua que permeti en seu buidat total, neteja i desinfecció.

3.- Quan en un abastiment s'hagi de recórrer al ús de cisternes o dipòsits mòbils, aquests seran només per al transport d'aigua i tindran clarament assenyalat i suficientment visible la indicació «per a transport d'aigua de consum humà», acompanyat d'un símbol d'una aixeta blanca sobre un fons blau.

En tot moment, el responsable del transport de l'aigua adoptarà les mesures de protecció oportunes per a que la qualitat de l'aigua de consum humà no es degradi, així com les mesures correctores que en el seu cas assenyalí l'autoritat sanitària.

4.-El gestor dels dipòsits públics o privats, de la xarxa d'abastament o la xarxa de distribució i el propietari dels dipòsits de instal·lacions interiors, vigilarà de forma regular la situació de la estructura, elements de tancament, vàlvules, canalitzacions i instal·lacions en general, realitzant de forma periòdica la neteja dels mateixos, amb productes que compleixin amb l'assenyalat en l'article 9. La neteja tindrà que tenir una funció desincrustant i desinfectant, seguida d'un esbandit amb aigua.

#### **Article 12. Distribució de l'aigua per a consum humà:**

1.- Les xarxes de distribució pública o privada tindrà en la mesura que sigui possible el disseny mallat, eliminant punts i situacions que facilitin la contaminació o el deteriorament de l'aigua distribuïda.

Disposaran de mecanismes adequats que permetin el tancament per sectors, amb la intenció de poder aïllar àrees davant de situacions anòmales, i de sistemes que permetin purgues per sectors per a protegir a la població de possibles riscos per a la salut.

2.-Abans de la seva posada en marxa i després de qualsevol activitat de manteniment o reparació que pugui suposar un risc de contaminació de l'aigua de consum humà, es realitzarà un rentat i /o desinfecció del tram afectat de canonades amb substàncies que senyala l'article 9 i els productes de construcció hauran de complir amb les especificacions del article 14.

3.-Les característiques i funcionament de la instal·lació interior no hauran de contaminar o empitjorar la qualitat de l'aigua de consum humà amb gèrmens o substàncies que puguin suposar un risc per a la salut dels consumidors.

#### **Article 17. Control de qualitat per a l'aigua destinada a consum humà:**

En termes generals en cada abastament es controlaran els paràmetres fixats en l'annex 1. Quan l'autoritat sanitària u disposi es controlaran aquells paràmetres o contaminants que es sospiti que puguin estar presents en l'aigua de consum humà i suposar un risc per a la salut dels consumidors.

2. El control de la qualitat de l'aigua de consum humà engloba els següents apartats:

a)Autocontrol de l'aigua de consum humà.

b)Vigilància sanitària.

c)Control de l'aigua en l'aixeta del consumidor.

3.-Tots els resultats derivats del control de la qualitat d'aigua de consum haurà d'estar recollits en un sistema de registre per a cada cas, preferiblement en suport informàtic i amb concordança amb el Sistema de *Información Nacional de agua de Consumo*.

4.- En tota mostra d'aigua de consum humà per l'autocontrol, vigilància sanitària i control en l'aixeta del consumidor, l'aigua es podrà classificar en:

a) «Apta per al consum»: Quan no presenti cap tipus de microorganisme, paràsit o substància en ninguna quantitat que pugui suposar un perill per a la salut humana; i compleixi amb els valors paramètrics especificats en les parts A, B i D del annex I o amb els valors paramètrics excepcionals per l'autoritat sanitària i sense perjudici del establert en l'article 27.7, determinats en els anàlisis.

b) «No apta per al consum»: quan no compleixi amb els requisits del paràgraf a) Si una aigua «no apta per al consum» assoleix valors de un o varis paràmetres quantificats que l'autoritat sanitària consideri que s'han produït o puguin produir efectes adversos sobre la salut de la població, es classificarà com «no apta per al consum i amb risc per a la salut».

## **Article 18. Autocontrol**

1.El autocontrol de la qualitat de l'aigua de consum humà es responsabilitat del gestor de cada una de les parts del abastiment y velarà per que un o varis laboratoris realitzin els anàlisis descrits en aquest article.

2. Sense perjudici del que presenta l'article 6, per l'aigua de consum humà subministrada a través de una xarxa de distribució, els gestors tenen la possibilitat de prendre mostres de paràmetres concrets dins l'abastament, en punts diferents dels que es refereix aquell article, si es pot demostrar la validesa dels resultats no afecta a la representativitat de la qualitat del aigua de consum humà des de la sortida de l'ETAP o del dipòsit fins al punt d'entrega al consumidor.

B) Els punts de mostreig per l'autocontrol de la indústria alimentària seran determinats per ells mateixos amb la supervisió de l'autoritat sanitària.

C) En el cas de cisternes i dipòsits mòbils, és responsabilitat del gestor dels mateixos i els punts de mostreig per a l'autocontrol seran els definits en l'article 6 d'aquest reial decret.

L'autoritat sanitària podrà requerir el canvi de la localització dels punts de mostreig determinats pel gestor o de la indústria alimentària, o augmentar el seu número si no responen a la representativitat necessària.

4. Els tipus d'anàlisis per a l'autocontrol son els següents:

1.º Examen organolèptic: consisteix en la valoració de las característiques organolèptiques de l'aigua de consum humà en base a l'olor, sabor, color y terbolesa.

2.º Anàlisis de control: aquest tipus d'anàlisis té com a objectiu facilitar al gestor i a l'autoritat sanitària proporcionar la informació sobre la qualitat organolèptica i microbiològica de l'aigua de consum humà, així com la informació sobre l'eficàcia del tractament de potabilització.

A) Paràmetres bàsics inclosos en aquest tipus d'anàlisis: olor, sabor, terbolesa, conductivitat, concentració d'ió Hidrogen o pH, amoni, «Escherichia coli» y bactèries coliformes.

B) Paràmetres que al menys se determinaran a la sortida de l'ETAP/dipòsit de capçalera o en cas contrari en la sortida del dipòsit de regulació i/o distribució.

a) Ferro: quant s'utilitzi com a floculant.

b) Alumini: quan s'utilitzi com a floculant.

c) Recompte de colònies a 22ºC.

d) «Clostridium perfringens» (incluides les espores).

L'autoritat Sanitària per a salvaguardar la salut de la població abastida, podrà incloure per cada abastiment altres paràmetres en els anàlisis de control.

## **Article 20. Control en l'aixeta del consumidor:**

a) Olor.

b) Sabor.

c) Color.

d) Terbolesa.

e) Conductivitat

- f) pH.
- g) Amoni.
- h) Bactèries coliformes.
- i) «Escherichia coli» (E. coli).
- j) Coure, crom, níquel, ferro, plom o altres paràmetres: quan es sospiti que una instal·lació interior té aquest tipus de material instal·lat.

En cas d'incompliment dels valors paramètrics, s'obtindran mostres en el punt d'entrega al consumidor.

#### **Article 21. Freqüència de mostreig:**

1. El número mínim de mostres en l'autocontrol haurà de ser representatiu del abastiment o parts d'aquesta i de la indústria alimentària, distribuïts uniformement al llarg de tot l'any.

c) L'examen organolèptic es realitzarà al menys dos cops per setmana i sempre i quant no es realitzi algun altre tipus d'anàlisi en aquell període.

L'autoritat sanitària, quan jutgi que podria existir un risc per a la salut de la població, velarà per a que el gestor incrementi la freqüència de mostreig per a aquells paràmetres que consideri oportuns.

2. La freqüència de mostreig per a cisternes i dipòsits mòbils es senyalarà en cada cas per l'autoritat sanitària

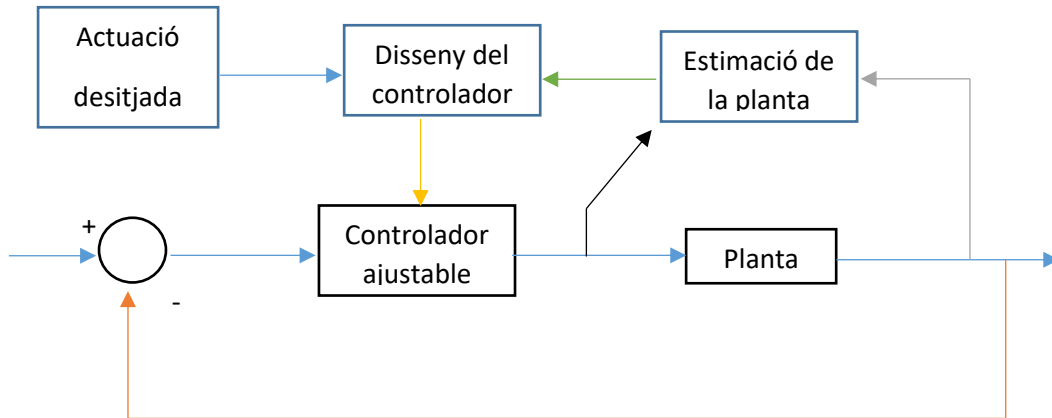
#### **Article 22. Situacions excepcionals per als paràmetres fixats:**

El gestor podrà sol·licitar a l'Administració sanitària l'autorització de situacions d'excepció temporal en respecte als valors paramètrics fixats quan l'incompliment d'un valor paramètric d'un determinat paràmetre de la part B del annex I en un abastiment donat, se ha produït durant més de 30 dies en total durant els últims 12 mesos i quan el subministrament d'aigua de consum humà no es pugui mantenir de cap altra forma raonable. L'autoritat sanitària establirà un nou valor paramètric, sempre que l'excepció no pugui constituir un perill per la salut de la població abastida.

*La Dirección General de Salud Pública del Ministerio de Sanidad y Consumo gestiona el Censo Nacional de les situacions d'excepció autoritzades per l'autoritat sanitària.*

## Annex B Reguladors auto ajustables (STR)

En el cas dels controladors autoajustables [10] s'utilitza per al seu disseny el Principi de equivalència[11], en el qual el disseny es realitza per a uns paràmetres coneguts, posteriorment es substitueixen pel seus estimats i es recalcula el controlador per a cada sortida del sistema.



En general en aquestes estructures de control es poden diferenciar tres parts:

L'algoritme recursiu per a l'estimació dels paràmetres.

El mecanisme que desenvolupa la tasca del disseny.

Un regulador amb paràmetres ajustables.

El procés pot ser definit pel seu model ARMAX

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} u(k) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} v(z)$$

On  $y(k)$  és la seqüència de sortida,  $u(k)$  la senyal de control del sistema,  $v(z)$  representa una senyal de pertorbació independent, normalment se li assigna una distribució gaussiana  $N(0, \Gamma)$ , on  $d$  representa el retard del sistema i  $z^{-1}$  és l'operador retard tal que compleix

$$y(k) = z^{-1}y(k+1)$$

Essent les seqüències A, B i C:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n}$$



## Annex C Primera aproximació del nombre de pols i zeros:

### Codi Matlab

```
%Dades mesurades de la sortida del sistema

y=[0, 0, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.3, 0.3, 0.4, 0.4, 0.5, 0.5,
0.6, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 0.9, 0.9, 0.9, 1, 0.9, 0.9, 0.7, 0.8, 0.7,
0.6, 0.5, 0.6, 0.8, 0.7, 0.7, 0.6, 0.8, 0.7, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 1.1,
1.3, 1.3, 1.4, 1.5, 1.4, 1.5, 1.4, 1.3, 1.3, 1.4, 1.3, 1.2, 1.2, 1.3,
1.2, 1.2, 1.2, 1.1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.1, 1.1, 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.9,
1.2, 0.9, 1, 1.1, 1.1, 1, 1.2, 1.1, 0.9, 0.9, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.6,
0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.8, 0.8, 0.7, 0.6, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 0.9,
0.8, 0.7, 0.5, 0.5, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 1.1, 1, 0.9, 0.7, 0.6,
0.8, 0.9, 0.8, 0.7, 0.7, 0.9];

%Punt de consigna establert en la sortida del sistema

u=[0, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7,
0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7,
0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8];

t=1:120;
figure(2)
plot(t,y,t,u)
title('Planta');
xlabel('mostres');
ylabel('concentració (ppm)');
legend('Concentració','setpoint');

y2=y';
u2=u';
data=iddata(y2, u2, 60);

NN=struc(1:10, 1:10,1:10); %combinacions de pols, zeros i retard a
probar
paraEstimar= iddata(y2(1:60)-mean(y2(1:60)), u2(1:60), 60); %valors
per a la construcció del model
paraValidar= iddata(y2(61:120)-mean(y2(61:120)), u2(61:120),60);
%valors per a la verificació del model
V=arxstruc(paraEstimar, paraValidar, NN); %Construcció del model per
cada un dels valors de pols, zeros i retard.
selstruc(V) %Mostrar valors obtinguts

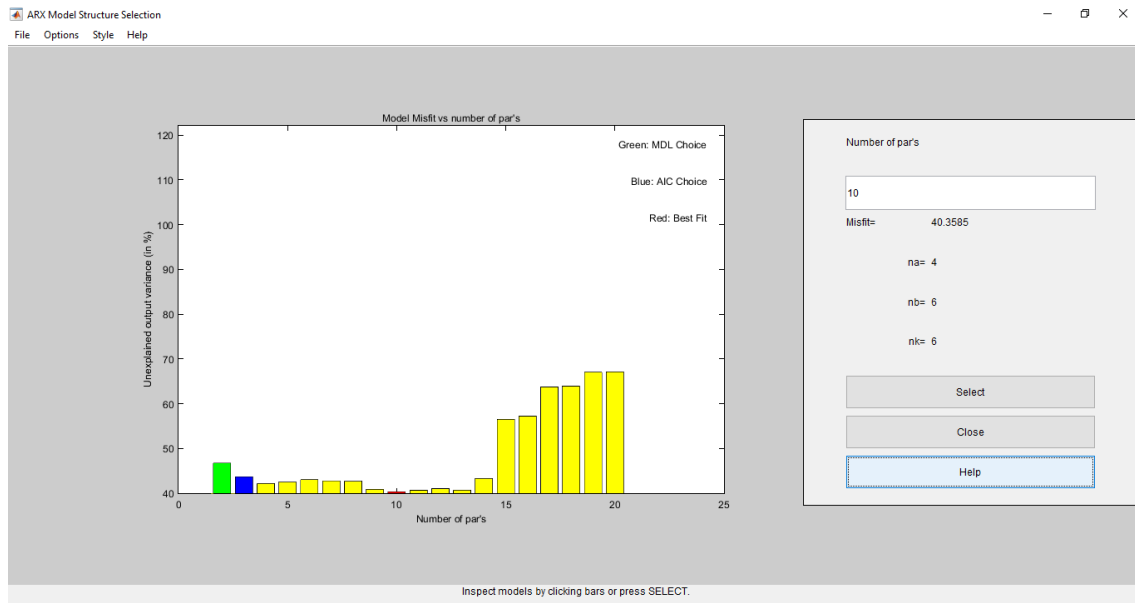
m=pem(paraEstimar,[4 6 0 0 0 6]);
present(m)

%armax
C=armax(paraEstimar, [4 6 0 6])

%BJ
D=bj(paraEstimar,[4 6 0 0 6])

%oe
E=oe(paraEstimar,[4 6 6])
```

## Resultats codi:



### Model ARX amb 4 pols i 6 zeros

```
m =
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)

A(z) = 1 - 0.9011 (+/- 0.1687) z^-1 - 0.1225 (+/- 0.2156) z^-2 + 0.2347 (+/- 0.207) z^-3 - 0.118 (+
/- 0.1595) z^-4

B(z) = 0.05288 (+/- 0.3863) z^-6 + 0.3688 (+/- 0.4877) z^-7 + 0.1108 (+/- 0.4861) z^-8 - 0.7532 (+/
- 0.4848) z^-9 + 0.3297 (+/- 0.3863) z^-10 - 0.07668 (+/- 0.1439) z^-11

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=6 nk=6
Number of free coefficients: 10
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Termination condition: Near (local) minimum, (norm(g) < tol).
Number of iterations: 2, Number of function evaluations: 9

Estimated using FEM on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 77.17% (prediction focus)
FPE: 0.01123, MSE: 0.009916
More information in model's "Report" property.
```

### Armax amb 4 pols i 6 zeros

```
Cp2 =
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)

A(z) = 1 - 0.9011 z^-1 - 0.1225 z^-2 + 0.2347 z^-3 - 0.118 z^-4

B(z) = 0.05288 z^-6 + 0.3688 z^-7 + 0.1108 z^-8 - 0.7532 z^-9 + 0.3297 z^-10 - 0.07668 z^-11

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=6 nk=6
Number of free coefficients: 10
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 77.17% (prediction focus)
FPE: 0.01123, MSE: 0.009916
```

## Box-Jenkins amb 4 pols i 6 zeros

```
D =
Discrete-time Polynomial model: y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t)
B(z) = -0.233 z^-6 + 0.6144 z^-7 + 0.459 z^-8 - 0.5874 z^-9

C(z) = 1 + 1.281 z^-1 + 1.458 z^-2 + 0.8912 z^-3 + 1.432 z^-4 + 1.196 z^-5 + 0.876 z^-6

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders:  nb=4  nc=6  nk=6
  Number of free coefficients: 10
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using BJ on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 69.74% (prediction focus)
FPE: 0.006734, MSE: 0.01742
```

## Output-Error amb 4 pols i 6 zeros

```
E =
Discrete-time OE model: y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + e(t)
B(z) = 1.419 z^-6 - 2.817 z^-7 + 1.442 z^-8 - 0.04118 z^-9

F(z) = 1 - 1.997 z^-1 + 1.06 z^-2 + 0.01251 z^-3 - 0.5017 z^-4 + 0.8756 z^-5 - 0.4491 z^-6

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders:  nb=4  nf=6  nk=6
  Number of free coefficients: 10
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using OE on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 40.78%
FPE: 0.01621, MSE: 0.0667
```

## Codi Matlab

```
u=[0, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7,
0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7,
0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.7, 0.7, 0.8,
0.8, 0.9];
```

end

```
%box-Jenkins
```

```
figure(3);
plot(t3,y3,t,y)
title('Model Box Jenkins');
xlabel('Mostres Ts=60s');
ylabel('Concentració (ppm)');
legend('model BJ', 'senyal mostrejada');
```

```

%Output-Error
y4=zeros(120,1);
t4=1:120;
for k=10:1:123;

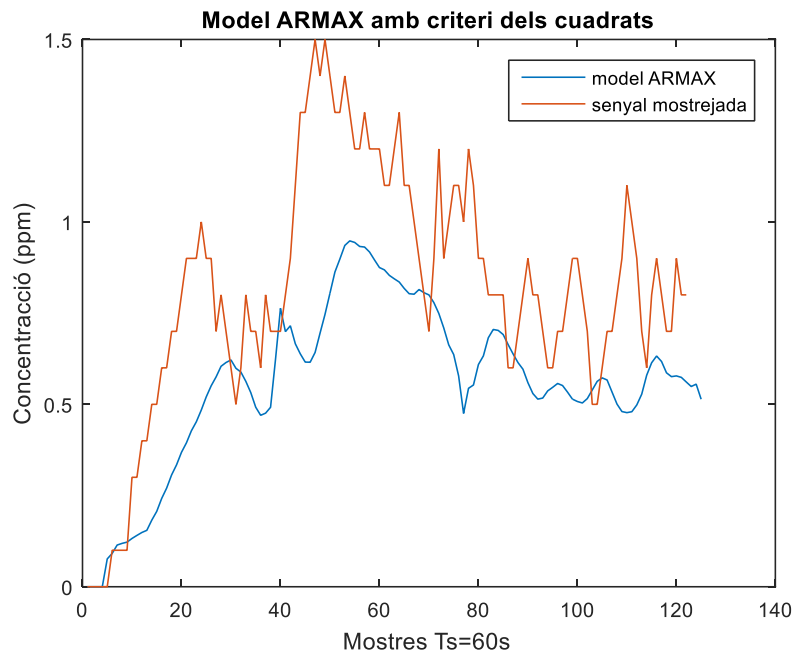
    y4(k-3)=1.997*y5(k-4)-1.06*y5(k-5)-0.01251*y5(k-6)+0.5017*y5(k-7)-
    0.8756*y5(k-8)+0.4991*y5(k-9)+1.419*u(k-4)-2.817*u(k-3)+1.442*u(k-2)-
    0.04118*u(k-1);
end

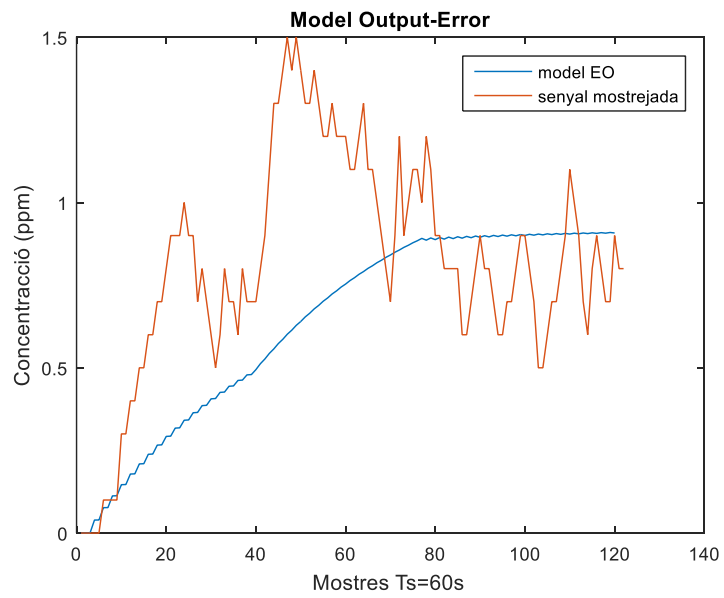
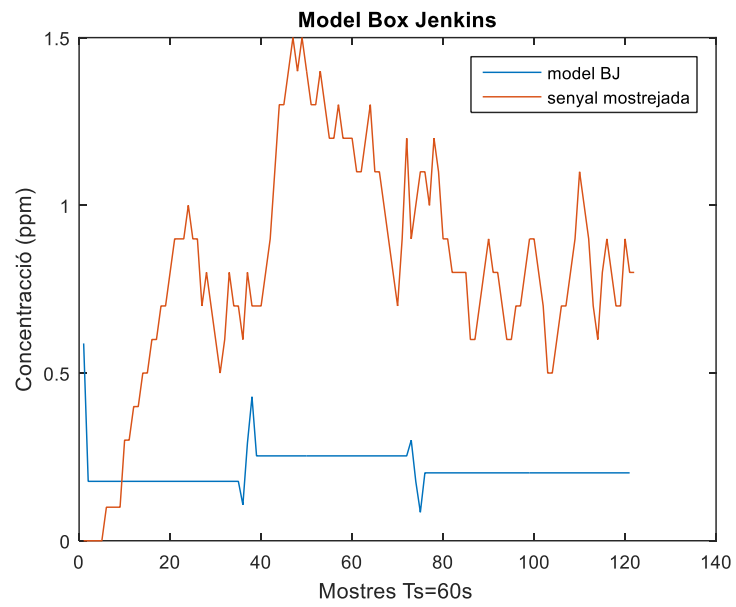
figure(4);
plot(t4, y5, t, y)
title('Model Output-Error');
xlabel('Mostres Ts=60s');
ylabel('Concentració (ppm)');
legend('model EO R', 'senyal mostrejada');

```

#### Resultats del codi

Tots els resultats mostrats amb 4 pols i 6 zeros.





## Annex E Selecció del nombre pols i zeros final del model ARMAX

## Codi Matlab

[illegible]

```
Cz4=arimax(paraEstimar, [4 6 0 6])
```

```
%arimax [6 7 0 6]
```

```
Cz5=arimax(paraEstimar, [4 7 0 6])
```

```
%arimax [8 6 0 6]
```

```
Cz6=arimax(paraEstimar, [4 8 0 6])
```

## Resultats codi

### Tres pols

```
Cp1 =  
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)  
A(z) = 1 - 0.8897 z^-1 - 0.1611 z^-2 + 0.1405 z^-3  
  
B(z) = 0.007541 z^-6 + 0.3196 z^-7 + 0.1304 z^-8 - 0.6836 z^-9 + 0.323 z^-10 - 0.06716 z^-11  
  
Sample time: 60 seconds  
  
Parameterization:  
Polynomial orders: na=3 nb=6 nk=6  
Number of free coefficients: 9  
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".  
Fit to estimation data: 78.31% (prediction focus)  
FPE: 0.01106, MSE: 0.00895
```

### Quatre pols

```
Cp2 =  
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)  
A(z) = 1 - 0.9011 z^-1 - 0.1225 z^-2 + 0.2347 z^-3 - 0.118 z^-4  
  
B(z) = 0.05288 z^-6 + 0.3688 z^-7 + 0.1108 z^-8 - 0.7532 z^-9 + 0.3297 z^-10 - 0.07668 z^-11  
  
Sample time: 60 seconds  
  
Parameterization:  
Polynomial orders: na=4 nb=6 nk=6  
Number of free coefficients: 10  
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".  
Fit to estimation data: 77.17% (prediction focus)  
FPE: 0.01123, MSE: 0.009916
```

### Cinc pols

```
Cp3 =  
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)  
A(z) = 1 - 0.9684 z^-1 - 0.05857 z^-2 + 0.1595 z^-3 - 0.4153 z^-4 + 0.3545 z^-5  
  
B(z) = -0.1181 z^-6 + 0.3804 z^-7 - 0.04183 z^-8 - 0.7162 z^-9 + 0.6183 z^-10 - 0.09975 z^-11  
  
Sample time: 60 seconds  
  
Parameterization:  
Polynomial orders: na=5 nb=6 nk=6  
Number of free coefficients: 11  
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".  
Fit to estimation data: 79.21% (prediction focus)  
FPE: 0.01018, MSE: 0.008218
```

### Sis pols

```
Cp4 =  
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)  
A(z) = 1 - 0.9504 z^-1 - 0.07952 z^-2 + 0.1669 z^-3 - 0.4241 z^-4 + 0.3069 z^-5 + 0.05313 z^-6  
  
B(z) = -0.1072 z^-6 + 0.3525 z^-7 - 0.03496 z^-8 - 0.7371 z^-9 + 0.6417 z^-10 - 0.09275 z^-11  
  
Sample time: 60 seconds  
  
Parameterization:  
Polynomial orders: na=6 nb=6 nk=6  
Number of free coefficients: 12  
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".  
Fit to estimation data: 79.11% (prediction focus)  
FPE: 0.01043, MSE: 0.008303
```

### Set pols



```

Cp5 =
Discrete-time ARX model:  $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$ 
 $A(z) = 1 - 0.9809 z^{-1} - 0.1519 z^{-2} + 0.2525 z^{-3} - 0.4597 z^{-4} + 0.3617 z^{-5} + 0.2599 z^{-6} - 0.2249 z^{-7}$ 

 $B(z) = -0.2204 z^{-6} + 0.3677 z^{-7} + 0.0754 z^{-8} - 0.7646 z^{-9} + 0.6878 z^{-10} - 0.1214 z^{-11}$ 

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=7 nb=6 nk=6
Number of free coefficients: 13
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 79.7% (prediction focus)
FPE: 0.01015, MSE: 0.007841

```

Vuit pols

```

Cp6 =
Discrete-time ARX model:  $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$ 

 $A(z) = 1 - 0.9765 z^{-1} - 0.1743 z^{-2} + 0.2313 z^{-3} - 0.4323 z^{-4} + 0.356 z^{-5} + 0.2834 z^{-6} - 0.1653 z^{-7} - 0.0712 z^{-8}$ 

 $B(z) = -0.2722 z^{-6} + 0.3696 z^{-7} + 0.08699 z^{-8} - 0.7285 z^{-9} + 0.6899 z^{-10} - 0.12 z^{-11}$ 

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=8 nb=6 nk=6
Number of free coefficients: 14
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 80.07% (prediction focus)
FPE: 0.01037, MSE: 0.007557

```

Quatre zeros

```

Cz2 =
Discrete-time ARX model:  $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$ 
 $A(z) = 1 - 0.875 z^{-1} - 0.1777 z^{-2} + 0.2034 z^{-3} - 0.06608 z^{-4}$ 

 $B(z) = 0.03564 z^{-6} + 0.3284 z^{-7} - 0.1144 z^{-8} - 0.2198 z^{-9}$ 

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=4 nk=6
Number of free coefficients: 8
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 78.62% (prediction focus)
FPE: 0.01059, MSE: 0.008693

```

Cinc zeros

```

Cz3 =
Discrete-time ARX model:  $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$ 
 $A(z) = 1 - 0.8816 z^{-1} - 0.1447 z^{-2} + 0.2443 z^{-3} - 0.1129 z^{-4}$ 

 $B(z) = 0.0599 z^{-6} + 0.362 z^{-7} + 0.127 z^{-8} - 0.6372 z^{-9} + 0.1237 z^{-10}$ 

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=5 nk=6
Number of free coefficients: 9
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 76.93% (prediction focus)
FPE: 0.01075, MSE: 0.01012

```

Sis zeros

```

Cz4 =
Discrete-time ARX model:  $A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)$ 
 $A(z) = 1 - 0.9011 z^{-1} - 0.1225 z^{-2} + 0.2347 z^{-3} - 0.118 z^{-4}$ 

 $B(z) = 0.05288 z^{-6} + 0.3688 z^{-7} + 0.1108 z^{-8} - 0.7532 z^{-9} + 0.3297 z^{-10} - 0.07668 z^{-11}$ 

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=6 nk=6
Number of free coefficients: 10
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 77.17% (prediction focus)
FPE: 0.01123, MSE: 0.009916

```

## Set zeros

```
Cz5 =
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)
A(z) = 1 - 0.916 z^-1 - 0.06309 z^-2 + 0.2321 z^-3 - 0.1327 z^-4

B(z) = 0.07983 z^-6 + 0.4017 z^-7 + 0.09422 z^-8 - 0.7482 z^-9 + 0.695 z^-10 - 0.559 z^-11 + 0.07254 z^-12

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=7 nk=6
Number of free coefficients: 11
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 74.19% (prediction focus)
FPE: 0.01134, MSE: 0.01267
```

## Vuit zeros

```
Cz6 =
Discrete-time ARX model: A(z)y(t) = B(z)u(t) + e(t)
A(z) = 1 - 0.9165 z^-1 - 0.06602 z^-2 + 0.2355 z^-3 - 0.1336 z^-4

B(z) = 0.07567 z^-6 + 0.4018 z^-7 + 0.09581 z^-8 - 0.7499 z^-9 + 0.6953 z^-10 - 0.5828 z^-11 + 0.08164 z^-12
+ 0.01932 z^-13

Sample time: 60 seconds

Parameterization:
Polynomial orders: na=4 nb=8 nk=6
Number of free coefficients: 12
Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using ARMAX on time domain data "paraEstimar".
Fit to estimation data: 74.65% (prediction focus)
FPE: 0.01199, MSE: 0.01223
```

## Annex F Control classic

Codi Matlab:

```
clear all
close all
clc
y=[0, 0, 0, 0, 0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.3, 0.3, 0.4, 0.4, 0.5, 0.5,
0.6, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 0.9, 0.9, 1, 0.9, 0.9, 0.7, 0.8, 0.7,
0.6, 0.5, 0.6, 0.8, 0.7, 0.7, 0.6, 0.8, 0.7, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 1.1,
1.3, 1.3, 1.4, 1.5, 1.4, 1.5, 1.4, 1.3, 1.3, 1.4, 1.3, 1.2, 1.2, 1.3,
1.2, 1.2, 1.2, 1.1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.1, 1.1, 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.9,
1.2, 0.9, 1, 1.1, 1.1, 1, 1.2, 1.1, 0.9, 0.9, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.6,
0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.8, 0.8, 0.7, 0.6, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 0.9,
0.8, 0.7, 0.5, 0.5, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.9, 1.1, 1, 0.9, 0.7, 0.6,
0.8, 0.9, 0.8, 0.7, 0.7, 0.9];
u=[0, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7,
0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7,
0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 0.7, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8,
0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8];

x=ones(1,250);
y3=zeros(1,120);
y4=zeros(1,120);
y9=zeros(1,120);
y10=zeros(1,120); %ARMAX

k1=3.;
k2=1;

%ARMAX[6 6 0 6]

%Bucle obert
y3(i)=0.9504*y3(i-1)+0.07952*y3(i-2)-0.1669*y3(i-3)+0.4241*y3(i-4)-
0.3069*y3(i-5)-0.05313*y3(i-6)-0.1072*k1*u(i-6)+0.3525*k1*u(i-7)-
0.03496*k1*u(i-8)-0.7371*k1*u(i-9)+0.6417*k1*u(i-10)-0.09275*k1*u(i-
11);

%Bucle tancat i controlador purament proporcional
y4(i)=0.9504*y4(i-1)+0.07952*y4(i-2)-0.1669*y4(i-3)+0.4241*y4(i-4)-
0.3069*y4(i-5)-0.05313*y4(i-6)+0.1072*k2*y4(i-6)-0.3525*k2*y4(i-
7)+0.03496*k2*y4(i-8)+0.7371*k2*y4(i-9)-0.6417*k2*y4(i-
10)+0.09275*k2*y4(i-11)-0.1072*k2*u(i-6)+0.3525*k2*u(i-7)-
0.03496*k2*u(i-8)-0.7371*k2*u(i-9)+0.6417*k2*u(i-10)-0.09275*k2*u(i-
11);
```

```

k9=1.6; %k=kp+kd
kd9=0.5;
k10=1.1;
kd10=0.3;
for i=13:120

%ARMAX bucle tancat i PD
y10(i)=0.9504*y10(i-1)+0.07952*y10(i-2)-0.1669*y10(i-3)+0.4241*y10(i-4)-0.3069*y10(i-5)-0.05313*y10(i-6)+0.1072*k10*y10(i-6)-0.3525*k10*y10(i-7)+0.03496*k10*y10(i-8)+0.7371*k10*y10(i-9)-0.6417*k10*y10(i-10)+0.09275*k10*y10(i-11)+0.1072*kd10*y10(i-7)+0.3525*kd10*y10(i-8)-0.03496*kd10*y10(i-9)-0.7371*kd10*y10(i-10)+0.6417*kd10*y10(i-11)-0.09275*kd10*y10(i-12)-0.1072*k10*u(i-6)+0.3525*k10*u(i-7)-0.03496*k10*u(i-8)-0.7371*k10*u(i-9)+0.6417*k10*u(i-10)-0.09275*k10*u(i-11)+0.1072*kd10*u(i-7)-0.3525*kd10*u(i-8)+0.03496*kd10*u(i-9)+0.7371*kd10*u(i-10)-0.6417*kd10*u(i-11)+0.09275*kd10*u(i-12);
end

figure(3)
plot(t,y, t, u,t,y3);
title('Model ARMAX bucle obert');
xlabel('Temps (minuts)');
ylabel('Concentració (ppm)');
legend('Model ARMAX','Senyal mostrejada','Setpoint');

figure(4)
plot(t,y4,t,y);
title('Model ARMAX bucle tancat');
xlabel('Temps (minuts)');
ylabel('Concentració (ppm)');
legend('Model ARMAX','Mostreig');

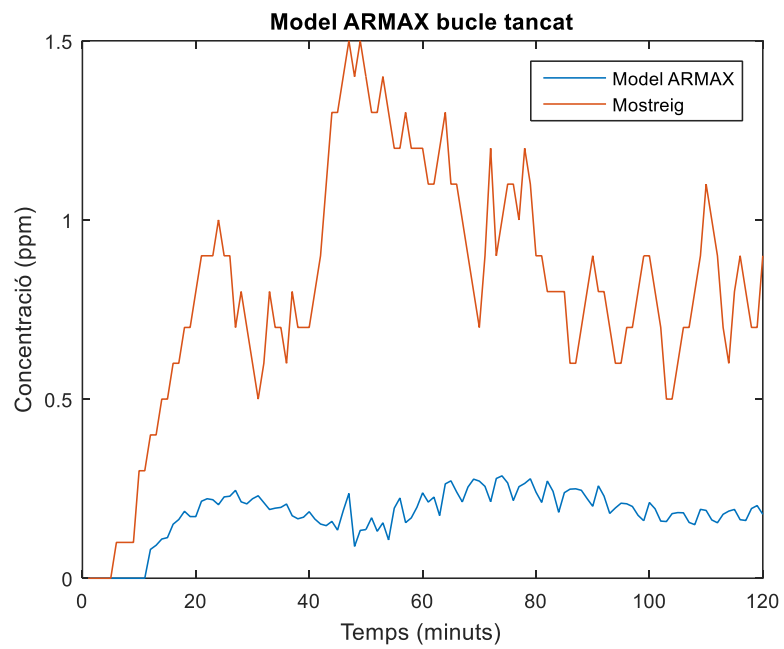
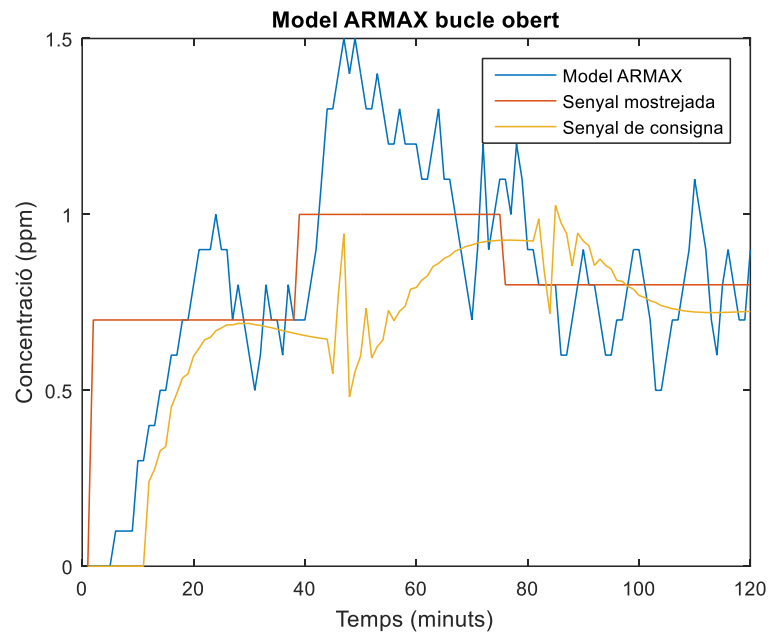
figure(10)
plot(t,y10,t,y);
title('Model ARMAX bucle tancat i PD');
xlabel('Temps (minuts)');
ylabel('Concentració (ppm)');
legend('Model ARMAX PD','Mostreig');

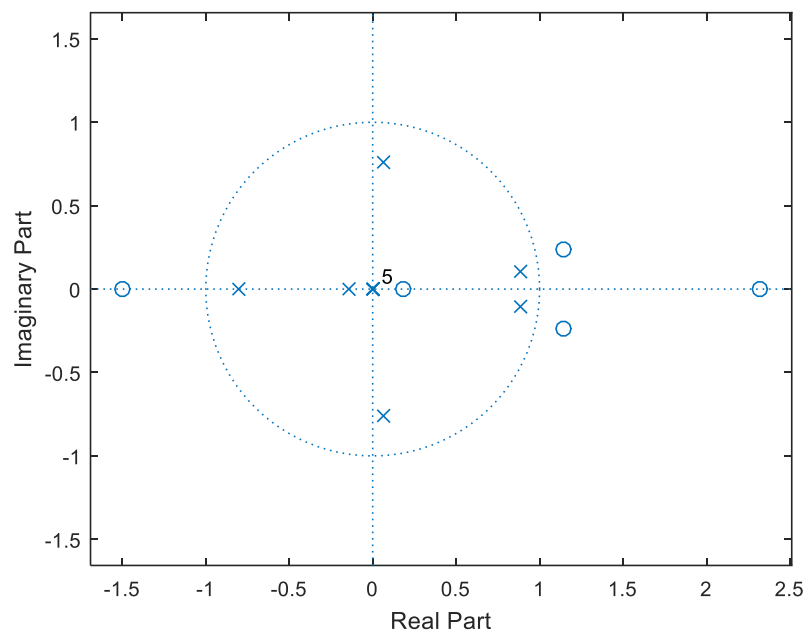
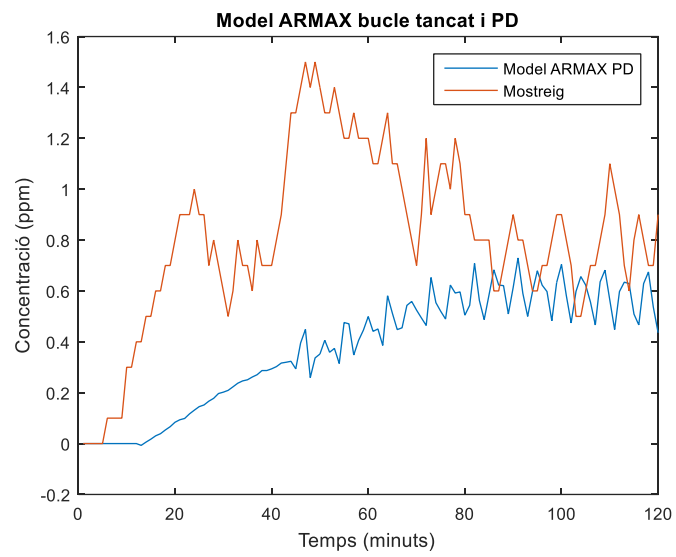
% Diagrama de pols i zeros ARMAX bucle obert
Yz=(-0.1072*k1*z^(5)+0.3525*k1*z^(4)-0.03496*k1*z^(3)-0.7371*k1*z^2+0.6417*k1*z^(1)-0.09275*k1)/(z^11-0.9504*z^(10)-0.07952*z^(9)+0.1669*z^(8)-0.4241*z^(7)+0.3069*z^(6)+0.05313*z^(5));

[ceros,polos,K]=zpkdata(Yz,'v');
[num,den]=tfdata(Yz,'v');
zplane(num,den);

```

## Resultats codi Matlab





## Annex G Control adaptatiu

### Codi Matlab

```
close all
clear all
clc
U=ones(250,1);
for w=1:250;

    if (75<w) && (w<=169)

        U(w)=U(w)*0.8;

    end

    if (170<=w) && (w<250)

        U(w)=U(w)*0.5;

    end

end

u=0.009;
ya=zeros(122,1);
b0=zeros(250,1);
b1=zeros(250,1);
b2=zeros(250,1);
b3=zeros(250,1);
for i=12:250

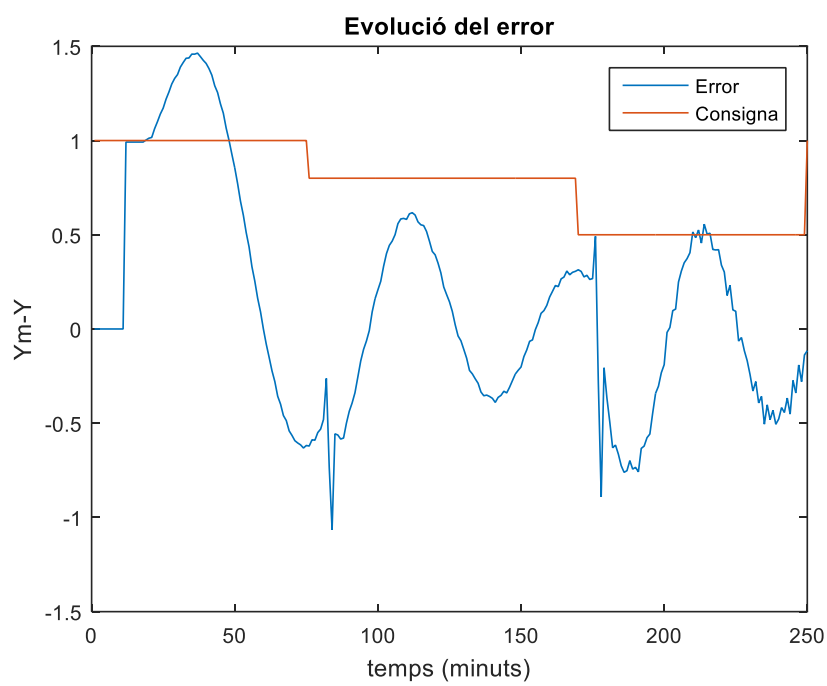
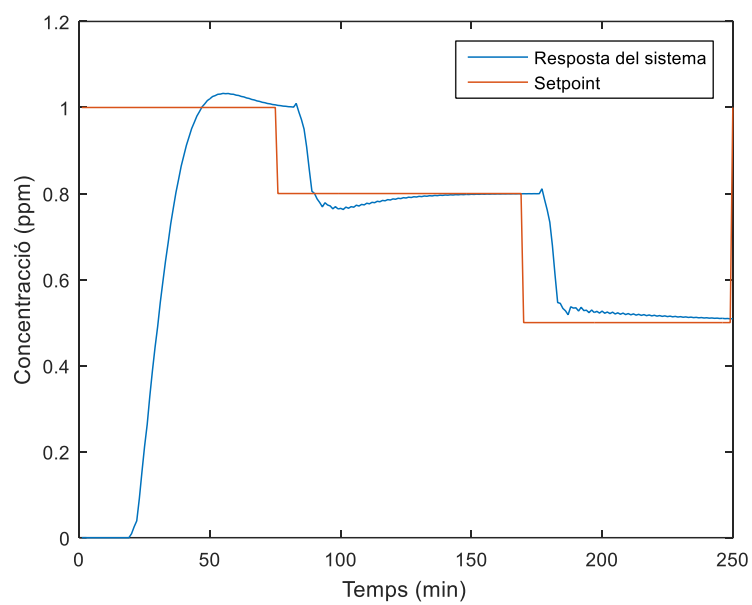
    %controlador
    b0(i)=b0(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i);
    b1(i)=b1(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-1);
    b2(i)=b2(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-2);
    b3(i)=b3(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-3);
    b4(i)=b4(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-4);
    b5(i)=b5(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-5);
    b6(i)=b6(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-6);
    b7(i)=b7(i-1)+2*u*E(i-1)*U(i-7);

    x(i)=b0(i)+b1(i)*U(i-1)+b2(i)*U(i-2)+b3(i)*U(i-3);

end

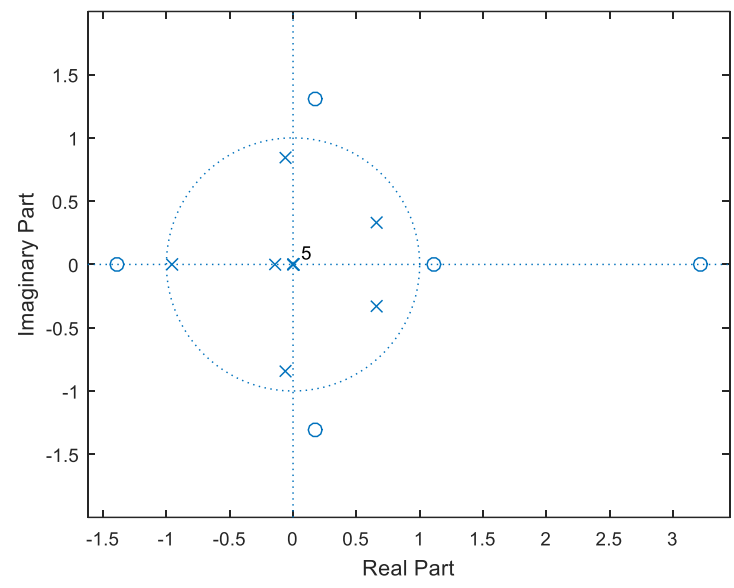
figure(6)
%representacion de los polos i zeros controlador:
%((q0*z^6+q1*z^5+q2*z^4+q3*z^3+q4*z^2+q5*z^1+q6)/(z^6))*
z=tf('z');
Yz=((-0.9275+0.6417*z-0.07668*z^2-0.03496*z^3+0.3525*z^4-
0.1072*z^5)/(0.05313*z^5+0.3069*z^6-0.4241*z^7+0.1669*z^8-0.07952*z^9-
0.09504*z^10+1*z^11));
[ceros,polos,K]=zpkdata(Yz,'v');
[num,den]=tfdata(Yz,'v');
zplane(num,den);
```

Resultats codi:



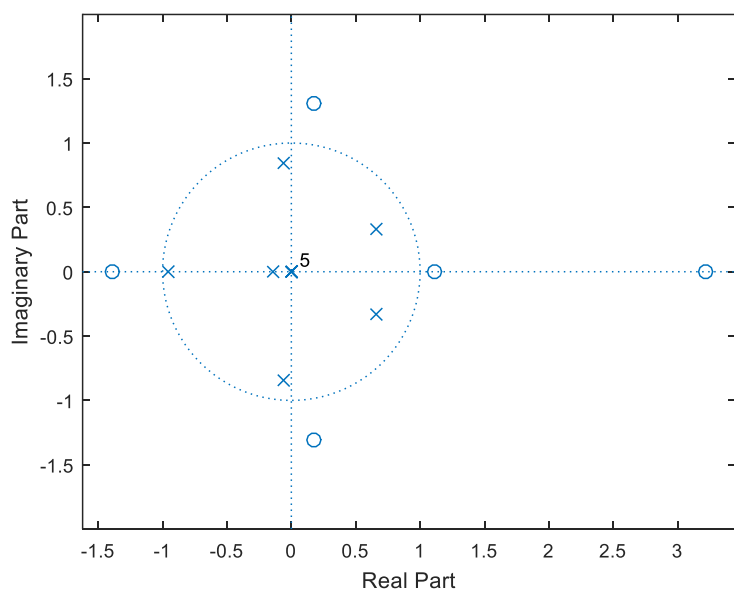


Mostra 50



```
num =  
      0      0      0      0      0      0 -0.1025  0.3370 -0.0334 -0.0733  0.6135 -0.8868  
  
den =  
      1.0000 -0.0950 -0.0795  0.1669 -0.4241  0.3069  0.0531      0      0      0      0      0
```

Mostra 250



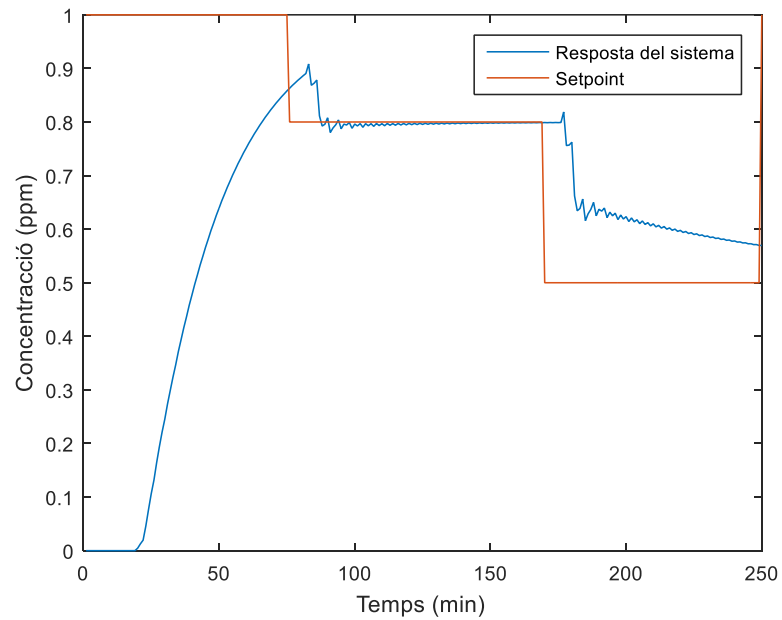
```

num =
    0    0    0    0    0    0 -0.1787  0.5878 -0.0583 -0.1279  1.0700 -1.5465

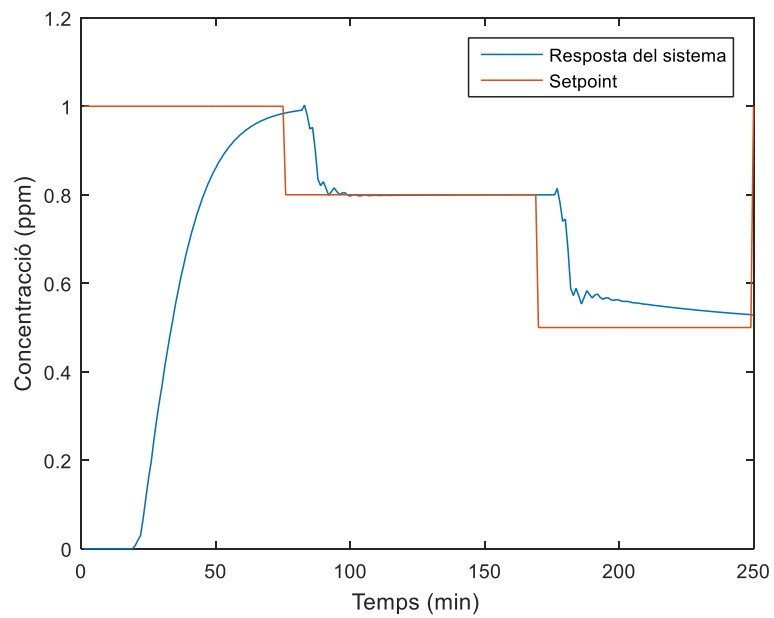
den =
    1.0000 -0.0950 -0.0795  0.1669 -0.4241  0.3069  0.0531  0    0    0    0    0

```

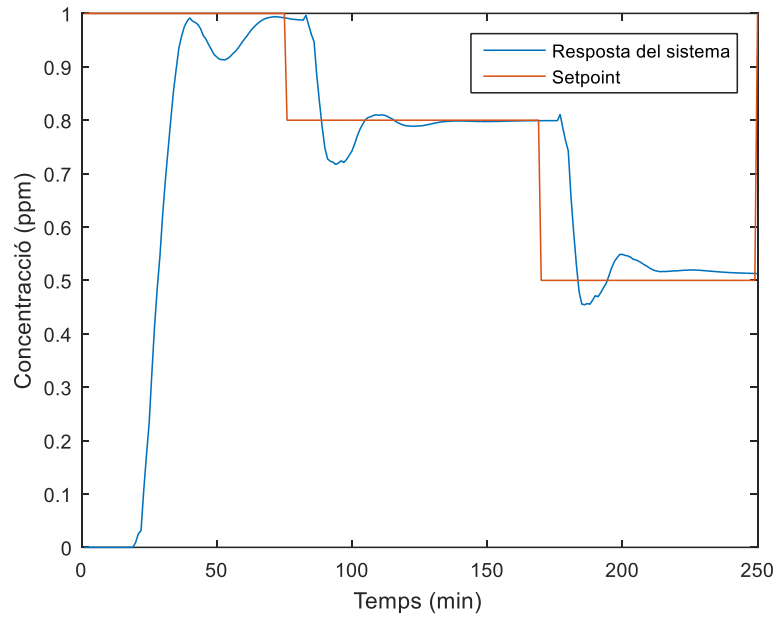
Controlador amb 1 paràmetre



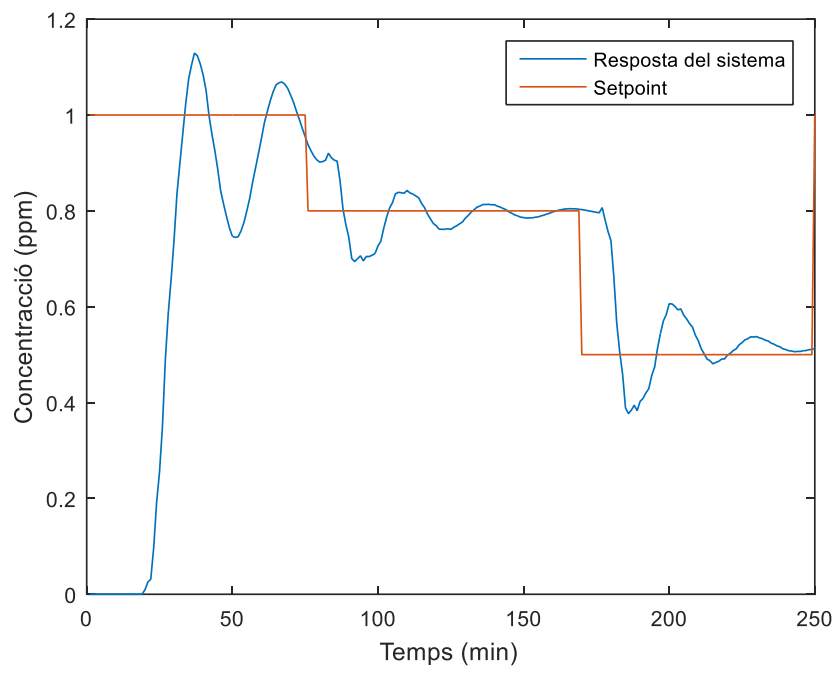
Controlador amb 2 paràmetres



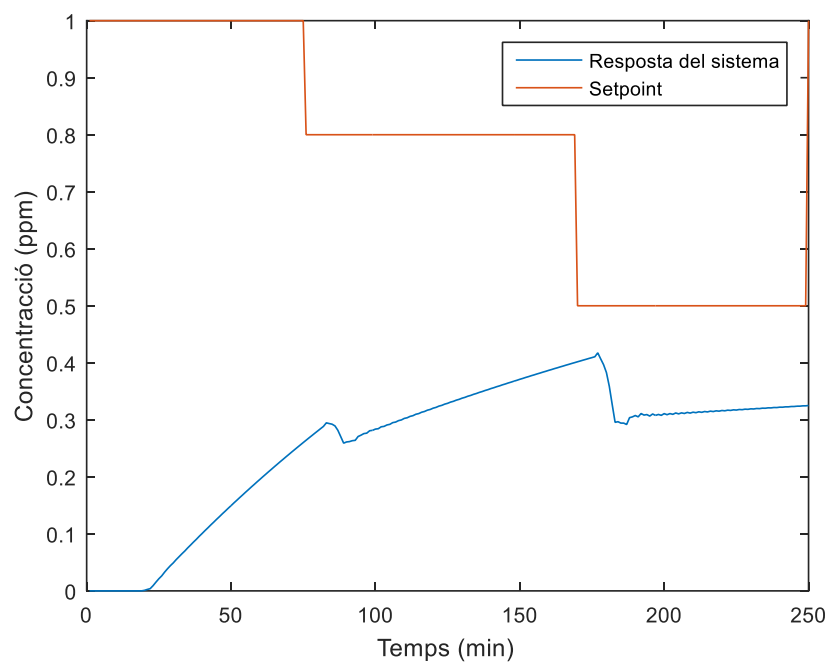
Controlador amb 4 paràmetres



Controlador 5 paràmetres



Valor  $U=0.0009$  de la llei d'adaptació



Valor  $U=0.09$  de la llei d'adaptació

